

Resumen

El ánimo del proyecto *Estudio comparativo de diferentes alternativas para la monitorización de parámetros para mantenimiento predictivo en aerogeneradores* que sigue a continuación, no es otro que el de analizar diferentes alternativas que se ofrecen en el mercado actual para la implementación de sistemas de monitorización de señales para la monitorización de aerogeneradores.

Se realizará una contextualización que permita ilustrar al lector los motivos por los cuales estas aplicaciones resultan críticas de cara a una correcta gestión del mantenimiento de estas máquinas. La extensión de la vida útil, la reducción de los costes de mantenimiento o la mera posibilidad de prever indisponibilidades de equipos, puede llegar a condicionar el atractivo económico - llegando incluso a afectar la viabilidad - de muchos proyectos.

Este tipo de proyectos suelen ser intensivos en capital y con planes de amortización considerablemente dilatados en el tiempo. A tal efecto, es común encontrar en la industria interés en la instalación de este tipo de sistemas para tranquilidad de diferentes actores involucrados - desde mantenedores hasta propiedad.

En las páginas que siguen, por tanto, se procederá a la presentación del estado del arte de diferentes soluciones industriales disponibles en el mercado a fecha de generación de este estudio.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. GLOSARIO	7
2. PREFACIO	9
2.2. Origen del proyecto	9
2.3. Motivación	9
INTRODUCCIÓN	11
2.4. Objetivos del proyecto	11
2.5. Alcance del proyecto	11
TIPOS DE MANTENIMIENTO	12
2.6. Mantenimiento correctivo	12
2.7. Mantenimiento preventivo	13
2.7.1. Ventajas mantenimiento preventivo	14
2.7.2. Desventajas mantenimiento preventivo	14
2.8. Mantenimiento predictivo	15
2.8.1. Ventajas del mantenimiento predictivo	15
2.8.2. Desventajas del mantenimiento predictivo	16
2.9. Estado del arte	16
2.9.1. Análisis de parámetros de trabajo	17
2.9.2. Termografías	17
2.9.3. Vibraciones	18
AEROGENERADORES	19
2.10. Breve historia de la energía eólica	19
2.11. Física en aerogeneradores	20
2.11.1. Principios físicos	20
2.11.2. Optimización de diseño	20
2.12. Componentes de un aerogenerador	21
2.12.1. Torre	21
2.12.2. Góndola	21
2.12.3. Buje	22
2.12.4. Palas	22
2.12.5. Generador	23
2.12.6. Sistemas de orientación	23

VIBRACIONES	25
2.13. Introducción a las vibraciones	25
2.13.1. Los fenómenos vibratorios.....	25
2.13.2. Utilidad del estudio de vibraciones	25
2.14. Los dominios temporal y frecuencial en señales	26
2.15. Caracterización de los fenómenos vibratorios	26
TIPOLOGÍAS DE MONITORIZACIÓN	28
2.16. Monitorización off-line.....	28
2.17. Monitorización on-line.....	28
CONDITION MONITORING	30
2.18. Introducción	30
2.19. Monitorización de tendencias.....	30
2.20. Comprobación de Condiciones	31
2.21. Condition monitoring: ventajas.....	32
ESTRUCTURA REQUERIDA	33
2.22. Transductores.....	34
2.23. Capa comunicación (transductor - equipos locales).....	35
2.23.1. Soluciones mediante cableado.....	35
2.23.2. Soluciones mediante conexión inalámbrica	35
2.23.3. Soluciones híbridas.....	35
2.24. Equipos de procesamiento locales	36
2.25. Capa de comunicación aerogenerador-parque	36
2.26. Almacenamiento datos (parque).....	38
2.27. Procesamiento y análisis de datos local (parque)	38
2.28. Capa comunicación parque-exterior	39
2.29. Análisis y supervisión de activos central.....	39
2.30. Almacenamiento de datos definitivo	39
TRANSDUCTORES	41
2.31. Acelerómetros.....	41
2.31.1. Acelerómetros piezoeléctricos.....	41
EQUIPOS DE PROCESAMIENTO LOCALES	43
2.32. Soluciones de arquitecturas modulares genéricas.....	43
2.33. Soluciones de arquitecturas modulares especializadas.....	44
HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE SEÑALES	45

CARACTERIZACIÓN DEL CASO A ESTUDIO	47
2.34. Justificación localización transductores	48
2.35. Caracterización de la máquina a estudio	49
2.36. Caracterización de emplazamiento del parque eólico	50
2.37. Prestaciones de los sensores de referencia	50
2.37.1. Acelerómetros	50
SOLUCIONES EXISTENTES EN EL MERCADO	51
2.38. SKF	51
2.38.1. Breve historia la compañía	51
2.38.2. SKF: Una solución <i>end-to-end</i>	51
2.38.3. SKF Wind - ajuste a problema tipo	55
2.39. National Instruments	56
2.39.1. Breve historia la compañía	56
2.39.2. NI: soluciones versátiles	56
2.39.3. NI LabView	60
2.39.4. NI - ajuste a problema tipo	61
2.40. Bently Nevada	63
2.40.1. Breve historia la compañía	63
2.40.2. BN Condition Monitoring: soluciones	63
2.40.3. System1: software de gestión y diagnóstico	69
2.40.4. Hardware BN - ajuste a problema tipo	71
2.40.5. Software BN - ajuste a problema tipo	72
2.41. SHINKAWA Electric Co. Ltd.	73
2.41.1. Breve historia la compañía	73
2.41.2. CMS: soluciones de monitorización	73
2.41.3. InfoSYS RV-200 System	77
2.41.4. SHINKAWA CMS - ajuste a problema tipo	78
ANÁLISIS COMPARATIVO	80
JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA	83
IMPACTO AMBIENTAL	87
CONCLUSIONES	88
AGRADECIMIENTOS	90
BIBLIOGRAFÍA	91
Referencias bibliográficas	91
Bibliografía complementaria	93

ANEXO I FICHAS TÉCNICAS SKF	94
ANEXO II FICHA TÉCNICA NI 9232	96
ANEXO III FICHA TÉCNICA BENTLY NEVADA (3500/42M)	98
ANEXO IV FICHA TÉCNICA BENTLY NEVADA (WSIM)	100
ANEXO IV FICHA TÉCNICA SHINKAWA ELECTRIC VM-5	103

1. Glosario

OPC *OLE for Process Control*, por sus siglas en inglés, son una serie de estándares y especificaciones para permitir la comunicaciones entre dispositivos industriales.

CAN *Controller Area Network*, por sus siglas en inglés, bus diseñado con la finalidad de posibilitar la comunicación entre dispositivos y micro controladores en aplicaciones sin computador. Cuenta con multitud de aplicaciones industriales, tras su popularización en la industria automovilística en la década de los 80 como cableado eléctrico para multiplexado.

LIN *Local Interconnect Network*, por sus siglas en inglés, se trata de un complemento al propio protocolo CAN para aplicaciones en las que la precisión temporal no sea tan crítica. Se trata de un protocolo que permite una mayor eficiencia sin importar el sacrificio en la tolerancias de fallo. Ideado para aplicaciones con menor criticidad (elevalunas eléctricas, en el caso de la industria de la automoción).

WIRELESS término en inglés cuya traducción al castellano es inalámbrico. Carente de cableado.

DAQ *Data Aquisition (Module)*, por sus siglas en inglés, se trata del componente de adquisición y tratamiento de señales. Cuenta con procesador embebido para el tratamiento de las señales, para su posterior envío. Dependiendo de las prestaciones del equipo, sus funciones pueden incluir interficie de usuario, puertos de entrada para acceder mediante computadora, sistemas alimentación de emergencia, etc.

TRANSDUCTORES Dispositivos que permiten la transformación o conversión de una señal de entrada de tipología variable (manifestación de energía) en otra a su salida. En el caso de los transductores piezoeléctricos, una deformación del cristal será transformada en corriente eléctrica.

GPRS *General Packet Radio Service*, por sus siglas en inglés, es un servicio de comunicación inalámbrica basado en el empaquetado de datos que permite la transmisión de datos con ratios de entre 56-114Kbps.

AGL *Above Ground Level*, por sus siglas en inglés, describe la altitud relativa desde un determinado sistema de referencia.

2. Prefacio

La creciente necesidad global de encontrar fuentes alternativas para la generación de energía eléctrica pasan por apostar por tecnologías comúnmente denominadas como renovables.

En este contexto, la energía eólica representa una de las mayores bazas para poder reducir la dependencia del sistema eléctrico de las fuentes de generación convencionales (cuyo *share* resulta abrumadoramente desequilibrado en favor de los combustibles fósiles a fecha de generación de este estudio).

Si bien se trata de una alternativa interesante de cara a la confección del nuevo *pool* eléctrico internacional, conviene delimitar las limitaciones de ésta como alternativa a la - aparentemente - insaciable demanda de energía de nuestros tiempos.

2.2. Origen del proyecto

Precisamente en esta dirección, el origen de este proyecto no es otro que el de proporcionar el análisis necesario para justificar la necesidad de instalar sistemas de monitorización de fenómenos críticos en el mantenimiento de aerogeneradores. Conocer, anticipar y prevenir indisponibilidades de máquina en intervalos de alta (demanda), puede convertirse en un factor determinante para la viabilidad de la energía eólica como un actor principal del futuro mapa eléctrico mundial.

2.3. Motivación

La motivación para la realización de este estudio no es otra que la de extender los conocimientos en el sector eólico como complemento a los conocimientos adquiridos en el campo de la energía solar fotovoltaica, como resultado de experiencias profesionales previas. Tras la realización de este estudio, se han aumentado las perspectivas laborales de manera significativa en el mundo de la monitorización de activos renovables.

Introducción

2.4. Objetivos del proyecto

Los objetivos de este proyecto no son otros que los de analizar diferentes alternativas existentes en el mercado, ahondando en las particularidades, diferencias y áreas de especial solvencia que estas presentan en el campo de la operación y mantenimiento.

Para su cumplimiento, se establecen los objetivos que se listan a continuación:

- Analizar algunas de las alternativas más representativas disponibles en el mercado y su solución en el apartado de adquisición de datos;
- Analizar algunas de las alternativas más representativas disponibles en el mercado y su solución en el apartado de procesamiento de datos;
- Realizar un análisis comparativo de prestaciones de las soluciones escogidas;
- Evaluar las ventajas económicas de adopción de este tipo de soluciones.

2.5. Alcance del proyecto

Dado que el campo de análisis puede ser excesivamente amplio, se acotará el contenido del mismo al análisis de las prestaciones e idoneidad que las diferentes soluciones ofrecerían ante un problema tipo.

Este problema tipo consistirá en la descripción de un aerogenerador existente en el mercado y la instalación de transductores en puntos específicos del equipo. Así mismo, y en consonancia con el ánimo de acotar las variables a contemplar para la comparativa de soluciones, se opta por escoger un emplazamiento hipotético del aerogenerador en tierra.

El análisis de las prestaciones de las soluciones disponibles en el mercado incluirá tanto el apartado de adquisición como el de procesamiento de los datos medidos por los sensores. Se excluye de este análisis el apartado de sensores. Tan solo se realizará mención específica en el supuesto de hallar incompatibilidades que puedan restringir la viabilidad de adopción de alguna solución.

Tipos de mantenimiento

Como se puede apreciar en tantos otros subsectores industriales, la evolución en las prácticas de mantenimiento ha permitido la adaptación de las soluciones originales a maquinaria cada vez más compleja - con un mayor número de componentes móviles, mayor electrónica o simplemente, de mayor tamaño - e intensiva en capital.

Es importante notar que la decisión de cómo realizar los planes de mantenimiento puede quedar condicionada por el plan de amortización del equipo. Si los intereses de mantenimiento de máquina no están alineados con los intereses de amortización de la misma, las estrategias de mantenimiento pueden llegar a variar sustancialmente de las recomendadas por el fabricante del equipo.

Resulta fácil imaginar, por tanto, que la criticidad del componente (o la máquina en su totalidad si se trata de una cadena productiva) condicionarán en buena medida el plan de mantenimiento al que se verá sometida.

2.6. Mantenimiento correctivo

Se trata de la estrategia de mayor antigüedad, considerada, a menudo, como la menos elegante dado que se basa enteramente en la reacción. Tan solo se preocupa de realizar la operación sobre el equipo una vez la avería – o averías - ya ha tenido lugar.

Si bien se puede encontrar justificación en la adopción de esta estrategia en determinados equipos o componentes de éstos, existen motivos suficientes para descartar esta estrategia en componentes críticos del equipo.

Algunos de los cuales se pueden encontrar en la lista que sigue:

- El grado de impredecibilidad de las averías puede condicionar la viabilidad económica del proyecto - especialmente si esta(s) se produce en picos de operación.
- El grado de impredecibilidad de las averías suele venir de la mano de una falta de indicadores acerca del origen de la misma. Para determinar qué causa la avería y su localización, por tanto, es necesario realizar tareas que se podrían denominar forenses - este efecto contribuye especialmente en la dilatación del tiempo total de parada.
- Para minimizar el impacto de la avería, el tiempo de respuesta debe ser el más reducido posible, por lo que se hace necesario contar con alta disponibilidad de

fuerza de trabajo cualificada - se puede averiar el equipo en mitad de la noche / día festivo.

- Para minimizar el impacto de la avería, el tiempo de respuesta debe ser el más reducido posible, por lo que se hace necesario contar con inventario de repuesto suficiente en todo momento - esto acarrea una necesaria infrautilización de los recursos del conjunto del proyecto (empresa).
- Para minimizar el impacto de la avería, a menudo, la fuerza de trabajo encargada de realizar la operación de reparación suele optar por la solución más rápida que, a menudo, suele ir en detrimento de la calidad de la misma. Esto puede derivar en la necesidad de realizar nuevas reparaciones en el futuro - no tan sólo en el ámbito del componente originalmente reparado.

2.7. Mantenimiento preventivo

Dado que la utilización - en exclusiva - de la estrategia anteriormente expuesta puede resultar, en el mejor de los casos, un tanto arriesgada, se puede optar por tomar actitudes con un mayor grado de proactividad.

Es por ello que en torno a la década de 1950 se desarrolla una nueva estrategia para el mantenimiento de equipos basada en las revisiones periódicas. Mediante esta técnica no es necesario esperar hasta el momento de rotura del componente, sino que se opta por prevenir esa situación mediante la planificación de inspecciones previas y regulares en el tiempo. En este caso, las indicaciones del fabricante serán de gran ayuda para la confección del plan de mantenimiento que más se ajuste a las necesidades y recursos del proyecto.

Para minimizar las averías, las inspecciones deberán ser en profundidad. A menudo, por tanto, será preciso realizar el desmontaje íntegro del equipo para poder observar el estado de los diferentes componentes con claridad.

Precisamente debido a la complejidad de este tipo de operaciones, resulta indispensable proceder con una adecuada planificación en el tiempo para optimizar el número de operaciones a lo largo de la vida útil del equipo (entendiéndose el término optimizar como sinónimo de minimizar).

Como no podría ser de otra manera, pues, existirán ventajas y desventajas en la aplicación de esta estrategia, algunas de las cuales se detallan a continuación.

2.7.1. Ventajas mantenimiento preventivo

- La correcta planificación de estas operaciones, podrá tener un impacto reducido en la producción/operación de los equipos.
- Se considera que la calidad de los trabajos se vería incrementada (en comparación con los que se realizarían con una actuación correctiva) debido a la inexistencia de la presión por poner la maquinaria de vuelta en funcionamiento a la mayor brevedad posible (para minimizar las pérdidas – no contempladas – por la parada).
- La planificación de inventario de componentes de repuesto se puede ajustar en torno a las necesidades reales, optimizando de esta forma, los recursos monetarios del proyecto (en comparación con la necesaria con una estrategia correctiva).

2.7.2. Desventajas mantenimiento preventivo

- La eliminación completa de la aparición de averías inesperadas sigue sin desaparecer.
- La incorrecta definición de los planes de mantenimiento preventivo, puede acarrear un considerable incremento de los costes. La incorrecta asignación de recursos:
 - Por exceso (realizar más paradas de las necesarias) puede acarrear la sustitución de componentes en más ocasiones de las estrictamente necesarias.
 - Por defecto (realizar menos paradas de las necesarias) requerirá de la realización de actuaciones correctivas.

Tras años de experiencia en la aplicación de este tipo de mantenimiento, se puede concluir que la aplicación de éste no garantiza la no aparición de roturas en los equipos.

A modo de ejercicio de contextualización, se puede destacar en este punto la aparición en la década de los 60s una variante de esta estrategia conocida como TPM - por sus siglas en inglés - *Total Productive Maintenance*.

Lo que esta estrategia propone, consiste en hacer partícipes a la totalidad de los agentes que intervienen en el proceso productivo del proceso de manteniendo (operadores de máquina, ingenieros de planta, personal de dirección, etc). Si cada recurso contribuye en la posible identificación de anomalías en el funcionamiento de la maquinaria se considera que se puede minimizar la aparición de averías.

En este contexto, y a modo de ejemplo, se podría considerar una observación de un operador de planta que identifica qué maquinaria no está respondiendo de la igual forma desde cierta intervención o tras el cambio de régimen de solicitudes. Esta sensación podría condicionar una inspección más rigurosa que de otra manera, posiblemente, no se hubiese llevado a cabo dado que no se cuenta con indicadores que puedan alertar de esta situación.

2.8. Mantenimiento predictivo

El siguiente hito en las estrategias de mantenimiento, conocido como mantenimiento predictivo, podría considerarse como la evolución del anteriormente mencionado TPM - que, a fin de cuentas, basa su fortaleza en el conocimiento del estado de la máquina por parte del personal habituado a trabajar con ella.

Si bien en el caso del correctivo, como el lector recordará, se tiene constancia del estado del equipo tan sólo cuando éste presenta rotura y en el caso del preventivo este conocimiento se tiene tan sólo en el momento en el que se realiza la revisión/inspección o, en el supuesto de producirse una rotura producto de incorrecta inspección preventiva anterior. El predictivo pretende anticiparse a la rotura mediante el conocimiento continuo del estado del equipo.

Este conocimiento del estado de los componentes críticos del equipo puede incluir - sin estar acotado a - solicitudes de esfuerzos, gradientes térmicos o vibraciones, entre otros.

El alto grado de complejidad de esta estrategia viene determinado por la necesidad de un correcto mapeado de los componentes del equipo y variables a monitorizar. Si no se *escucha* en la dirección correcta y con el instrumento adecuado, existirá la posibilidad que una anomalía potencialmente dañina para el equipo pase inadvertida.

Análogamente a los apartados anteriores, a continuación se listan algunas de las ventajas y desventajas que presenta esta estrategia.

2.8.1. Ventajas del mantenimiento predictivo

- Identificación, previa al paro del equipo, con conocimiento del foco del problema (lugar físico en el que se origina). Los tiempos de paro tenderán a reducirse en comparación a las alternativas descritas anteriormente.
- Debido a la extrapolación del rango temporal en el que el elemento puede entrar en fallo, se puede realizar una planificación de producción, niveles de inventario de repuesto, disponibilidad de los recursos de mantenimiento, etc. Optimizando de esta forma los recursos monetarios adaptándolos a las necesidades del proyecto.

- Debido al carácter continuo de la monitorización de los equipos, se conocerá en todo momento el comportamiento de la misma ante diferentes condiciones de trabajo. Esta información puede resultar imprescindible para realizar estimaciones de capacidad de carga ante eventuales picos de trabajo en el futuro.

2.8.2. Desventajas del mantenimiento predictivo

- La implantación de esta estrategia requiere de una inversión monetaria inicial de mayor cuantía en comparación con las alternativas planteadas anteriormente. Si bien es cierto que la amortización de la misma justifica su adopción en aerogeneradores.
- Como mencionado con anterioridad, existe el riesgo de no identificar correctamente los componentes/partes del equipo críticos a monitorizar. Las consecuencias de este hecho serán de gravedad variable.
- Es necesaria la correcta interpretación de los datos generados en la monitorización. A tal efecto, se hará necesario contemplar costes de formación de los recursos - personal - encargados de la interpretación y digestión de los datos.

2.9. Estado del arte

A modo resumen de lo anteriormente descrito, será habitual encontrar en la industria una combinación de estrategias de cara al mantenimiento de una máquina o, por extensión, de un conjunto de ellas (por ejemplo, una cadena de montaje).

Si se toma el ejemplo de un proceso de fabricación en el que se pueden realizar multitud de tareas en diferentes máquinas, no sería extraño encontrar una combinación similar a la propuesta a continuación:

Correctivo	<ul style="list-style-type: none">▪ En maquinaria cuyo coste es bajo▪ En maquinaria cuyo impacto en el proceso de producción no es crítico▪ En maquinaria cuyo tiempo de reparación es bajo▪ En maquinaria cuyo inventario de repuestos no suponga un coste de almacenamiento elevado
------------	---

Preventivo	<ul style="list-style-type: none">▪ En maquinaria cuyo impacto en el proceso de producción es crítico▪ En maquinaria cuyo tiempo de reparación es moderado/alto▪ En maquinaria cuyo inventario de repuestos suponga un coste de almacenamiento elevado
Predictivo	<ul style="list-style-type: none">▪ En maquinaria cuyo coste es elevado▪ En maquinaria cuyo impacto en el proceso de producción es crítico▪ En maquinaria cuyo tiempo de reparación es moderado/alto

Tabla 4.1 Ejemplos de tipologías de maquinaria susceptibles de ser mantenidas por las diferentes estrategias

En el caso que ocupa este estudio, dada la naturaleza de la maquinaria, la mejor alternativa consistirá en intentar modelizar el comportamiento de los componentes en base a técnicas predictivas minimizando la necesidad de realizar actuaciones de tipo preventivo y/o correctivo.

Para ello, a continuación, se procede a la mención de las diferentes estrategias para la modelización de una hipotética función avería.

2.9.1. Análisis de parámetros de trabajo

Como su nombre indica, se trata de la monitorización de indicadores concretos de máquina. El conocimiento del espectro o rango de trabajo de éstos es indispensable para poder alertar en el supuesto de alcanzar valores anómalos (valores que se hallen fuera de rango de operación normal).

Si bien un conveniente mapeado de variables críticas se convierte en una herramienta de gran valor, en contraposición, un incorrecto - o insuficiente - mapeado, puede reducir considerablemente la fiabilidad de este método.

2.9.2. Termografías

El análisis de temperaturas de trabajo puede determinar anomalías en el mapa térmico de la máquina. Si determinados componentes de la máquina presentan temperaturas fuera de rango para el régimen de funcionamiento en el que se encuentra, podría ser indicativo de fallos en componentes eléctricos o un incorrecto funcionamiento del sistema de refrigeración, entre otros.

Un gradiente de temperaturas anómalo, así mismo, puede proporcionar pistas a cerca del incorrecto aislamiento térmico entre componentes.

Como regla general, para este tipo de análisis se suelen emplear cámaras de infrarrojos si bien existirán en el mercado instrumentos de medición de temperatura (termómetros) que permitirán un procesamiento de estos datos en aplicaciones específicas.

2.9.3. Vibraciones

A diferencia del análisis de parámetros de trabajo - en los que se analiza una única variable - este método permite analizar la respuesta vibratoria a fuerzas originadas en cualquier punto del equipo.

Debido a la naturaleza de propagación de este fenómeno será posible determinar anomalías de esfuerzos en diferentes direcciones, en función de la colocación de los elementos de medida de éstas. Así, si lo que se pretende es controlar un conjunto de componentes concretos de la máquina, se podrá optimizar la colocación de medidores en torno a puntos clave donde se podrían manifestar vibraciones debido a incorrecto funcionamiento de eje(s), par excesivo, etc.

Aerogeneradores

2.10. Breve historia de la energía eólica

Quizá el primer ejemplo de aplicaciones para la utilización de la energía eólica se pueda encontrar en el transporte. En la antigüedad (y todavía hoy) la utilización de velas en embarcaciones permitía la navegación por ríos, lagos y mares ofreciendo a los navegantes la posibilidad de trasladar personas, animales o bienes. Este hecho contribuirá al florecimiento de la economía y mercadeo entre pueblos y civilizaciones.

Los siguientes ejemplos se pueden encontrar en la antigua Mesopotamia, en torno al siglo XI DC, con la aparición de los primeros molinos de viento. Empleados para la muela de grano, serán exportados a lo largo y ancho del mundo (llegando incluso a convertirse en iconos de la literatura universal).

Debido a la innovación de la aplicación: se logra ya entonces la transformación de la energía cinética inherente en el fluido en movimiento (flujo de aire) en movimiento rotativo (rueda de piedra utilizada para la muela de grano) se considera un avance en la técnica considerable. Tanto es así, que, un milenio después, el funcionamiento de las máquinas modernas se sigue basando en el aprovechamiento de esta energía en la misma medida.

Si bien el aprovechamiento de la energía eólica tiene manifestaciones a lo largo de milenios y a través de civilizaciones, esta técnica para la obtención de energía ha sido igualmente víctima de la abrumadora utilización de combustibles fósiles desde la revolución industrial.

En las últimas décadas, sin embargo, debido a la gran dependencia a fuentes de energía derivadas de combustibles fósiles que las sociedades modernas han adquirido - ocasionando déficits en balanzas comerciales, alta volatilidad de suministro debido a la localización de yacimientos en lugares de conflicto a lo que hay que sumar los efectos contaminantes - contribuyen a que el desarrollo de la tecnologías renovables - y la eólica especialmente - se encuentre en un momento de efervescencia.

A fecha de realización de este estudio, el *share* de la energía eólica para la producción de electricidad del sistema eléctrico (peninsular) español es del orden del 21,8% [1] con una potencia instalada de 22,988 GW [2]. A modo de contextualización, el pico histórico de demanda - en el sistema eléctrico peninsular español a fecha de realización de este estudio - de potencia suministrada tuvo lugar el 17 de diciembre de 2007, a las 18:53 con un total de 45,450 GW [1].

2.11. Física en aerogeneradores

2.11.1. Principios físicos

Como no podría ser de otra manera, el principio que rige el comportamiento de los aerogeneradores se basa en el aprovechamiento de la energía cinética del viento (flujo de aire) para su posterior transformación en energía eléctrica.

El grado de aprovechamiento de la energía contenida en el flujo de aire, no obstante, viene acotada por el conocido como Límite de Betz. En sus estudios y publicaciones, el físico alemán Albert Betz, concluye que el aprovechamiento de la energía cinética de un flujo de aire por un actuador en forma de disco no puede ser superior a los 16/27 (0,593).

Este factor de limitación físico, pasa a denominarse como coeficiente de Betz.

A modo ilustrativo, por tanto, si se toma una superficie de control (un disco de radio R), la potencia máxima extraíble de un flujo de fluido será:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \frac{16}{27} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Siendo:

- ρ : densidad del fluido (aire);
- v : velocidad del fluido (velocidad lineal);
- P : potencia extraíble.

Dada la limitación física (insalvable) conocida como el límite de Betz, la mejora de la técnica y diseño para la fabricación de aerogeneradores se convierte en todo un reto para la industria. Mejorar el rendimiento de estas máquinas puede suponer la diferencia entre el éxito y el ostracismo de esta tecnología.

Las estrategias para cumplir con este objetivo, por tanto, deberán tener en cuenta las diferentes variables que influyen en la capacidad de extraer la energía del fluido (aire).

2.11.2. Optimización de diseño

Si se toma la ecuación 5.1 descrita en el apartado anterior, se puede establecer con cierta rapidez que la única variable con la que se puede incrementar la potencia de flujo extraíble, queda delimitada a la capacidad de barrido del aerogenerador (superficie de control).

A mayor superficie de barrido, mayor potencia de viento extraíble a igualdad de condiciones de trabajo (densidad y velocidad de fluido): aerogeneradores de mayor envergadura permitirán aprovechar la potencia eólica en mayor medida.

Si bien los principios detallados anteriormente son irrefutables, conviene destacar la inevitable existencia de eficiencias a la hora de transformar la potencia extraíble teórica en potencia extraída.

Es precisamente en este punto donde la técnica y diseño de aerogeneradores toma especial importancia. Si aparentemente hasta este punto bastaba con diseñar máquinas de mayor envergadura para incrementar la potencia extraíble, al introducir el condicionante de la eficiencia de extracción: los perfiles aerodinámicos de las palas tomarán un mayor protagonismo.

2.12. Componentes de un aerogenerador

2.12.1. Torre

Cilindro metálico de altura variable que proporciona la elevación suficiente de los elementos generadores para permitir el barrido de las palas. El diámetro exterior del mismo podrá ser variable en función de la altura del aerogenerador.

Pese a que su cometido principal no es otro que el de actuar como estructura de sujeción, debe necesariamente proporcionar la capacidad de acceso a la parte superior de la estructura. Será habitual, por tanto, hallar un sistema de escalares para cumplir con este cometido.

Pese a que en los primeros aerogeneradores podía ser habitual encontrar ejemplos de escaleras exteriores, en la actualidad la tendencia es a encontrarlas en el interior de la estructura. Determinados aerogeneradores de gran altura pueden llegar incluso a contener un sistema híbrido compuesto por un pequeño elevador como complemento a las escaleras. Esta solución permitiría un acceso más rápido a la parte superior (útil en aerogeneradores de múltiples decenas de metros de altura).

2.12.2. Góndola

Habitáculo situado en la parte superior de la estructura que actúa como contenedor de la maquinaria necesaria para la transformación de la energía mecánica (en forma de rotación del eje) en energía eléctrica.

Los componentes hallados en la cabina variarán en función de la tecnología de la que se trate. Debido a la evolución de la técnica, en la actualidad existen diferentes disposiciones o configuraciones para la generación de energía eléctrica.

- Caja multiplicadora: se trata de la configuración más habitual.

Permite el uso de una relación de transmisión muy elevada, pasando de un régimen de giro del orden de 20 rpm (lado palas) a 1800rpm (lado generador). La disposición en serie de la caja multiplicadora con el generador asíncrono puede incluir de igual manera, sistemas de rectificación y variadores de frecuencia.

Se trata de la configuración más extensiva en dimensiones debido a la gran cantidad de elementos que conformarán el sistema. Esta será la disposición de aerogenerador tipo que se analizará en los capítulos que siguen.

- *Direct Drive*: como su nombre anticipa, esta solución no cuenta con etapas intermedias y permite la transformación de la energía mecánica del lado palas directamente al generador síncrono.

Debido a la naturaleza de esta solución, se trata de la que presenta un ahorro en espacio mayor, dado que no requiere de sistemas complementarios para la generación de energía eléctrica.

- Configuración Híbrida: como combinación de las anteriormente citadas, se puede encontrar la denominada como híbrida. En esta disposición se suelen encontrar cajas multiplicadoras que presentan una relación de transmisión menor a la disposición clásica con generadores síncronos en serie.

2.12.3. Buje

Elemento primordial para el óptimo aprovechamiento de las condiciones de viento. En el interior de este elemento, se hallan los diferentes sistemas de actuadores para la confección de los ángulos de ataque de las palas.

2.12.4. Palas

Quizá los elementos más característicos de la estructura en su conjunto, se trata de perfiles aerodinámicos de gran envergadura que rotarán en función de la disposición del viento. La evolución de estos componentes en los últimos años ha permitido una mejora sustancial de las prestaciones de máquina en operación.

Si bien un incremento del área de barrido de palas incrementa la potencia extraíble del viento (propiedad que ha marcado a fuego la tendencia de la industria de desarrollar aerogeneradores de mayor tamaño) conviene destacar las limitaciones o restricciones técnicas de trasladar estos elementos desde su lugar de fabricación hasta el emplazamiento de ensamblaje e instalación final.

Debido a la naturaleza de estos elementos (se trata, por diseño de piezas macizas e indivisibles) el transporte terrestre se puede convertir en un ejercicio de concatenación de proezas al volante a cargo del chófer del convoy.

2.12.5. Generador

Se trata del componente encargado de generar corriente eléctrica en el aerogenerador. Sin ahondar en exceso en las particularidades y fenómenos físicos que rigen estos componentes, su funcionamiento se basa en la transformación del movimiento rotativo del eje (energía mecánica) en corriente eléctrica (energía eléctrica).

Como cabría esperar, se trata de uno de los elementos de mayor criticidad en el conjunto, dado que su función es la de cumplir con el objetivo de los aerogeneradores: generar energía eléctrica.

2.12.6. Sistemas de orientación

Utilizados para garantizar la correcta orientación de la turbina, basándose en la dirección en de la que proviene el viento, estos sistemas permiten optimizar la producción de electricidad de cada aerogenerador.

La orientación, denominada como orientación forzada, es posible gracias a la acción de accionamientos mecánicos en la base de la góndola que permiten la rotación de ésta. Gracias a estos sistemas, se puede considerar que los aerogeneradores tendrán tendencia natural a una correcta orientación. La transición hacia esa posición, si embargo, genera esfuerzos en las palas precisamente por el error en la alineación con la dirección del viento.

Adicionalmente, estos sistemas proporcionan la posibilidad de recuperar la torsión original de cableado desde la góndola hasta la base ante la continuada reorientación en la misma dirección.

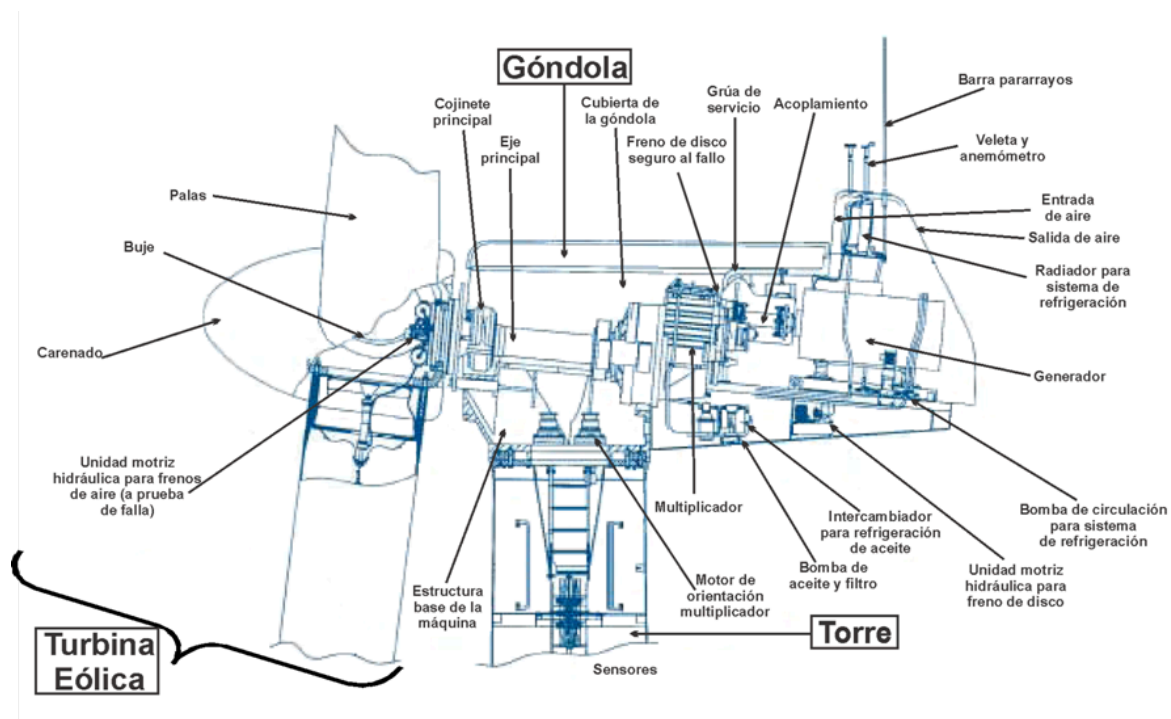


Figura 5.1 Esquema de los componentes principales que conforman un aerogenerador. *Google.com*

Vibraciones

2.13. Introducción a las vibraciones

2.13.1. Los fenómenos vibratorios

Pese a que la definición de vibración puede presentar matices en función del origen de la misma, se podría decir que cualquier cuerpo en vibración es aquel que describe un movimiento oscilatorio en torno a una posición de equilibrio.

Así, si se mide el número de oscilaciones por unidad de tiempo se halla la frecuencia de la vibración cuya unidad de medición en el sistema internacional es el Hertz (Hz).

Si bien la definición anterior permite definir con claridad un fenómeno vibratorio dado, la realidad demuestra que a menudo, las vibraciones que se originan en actividades industriales no podrán ser identificadas con facilidad. Los fenómenos vibratorios observados a menudo serán el resultado de la composición de diferentes fenómenos vibratorios menores (con diferentes frecuencias y amplitudes).

Serán precisamente estas condiciones las que obligarán a realizar un análisis con mayor detenimiento en el dominio frecuencial. Así, será posible realizar el análisis de la amplitud de la(s) de vibraciones en función de la frecuencia. Pese a que el análisis en el dominio frecuencial resultará de vital importancia, puede, en ocasiones, resultar interesante realizar este análisis en el dominio temporal.

Así, será el análisis en el dominio frecuencial el que proporcione información acerca de la gravedad de los fenómenos vibratorios que tengan lugar en la máquina rotativa, permitiendo así mismo anticipar una posible estrategia para garantizar la integridad y viabilidad de la máquina durante la totalidad de su vida útil.

2.13.2. Utilidad del estudio de vibraciones

Resulta sencillo, pues, identificar el (gran) abanico de situaciones en las que se puede estar interesado en realizar la medición de éstas. A modo de ejemplo, suele ser habitual interesarse por el estudio de las vibraciones:

- Para poder aislarlas - de cara a un mejor funcionamiento del conjunto del sistema;
- Para poder modelizar el funcionamiento de la máquina de cara a realizar mejores tareas de mantenimiento, anticipares momentos de fallo o lugares en los que se puedan producir roturas de máquina.

2.14. Los dominios temporal y frecuencial en señales

Como se ha comentado en el sub-apartado anterior, la utilización del método de análisis de amplitud de las oscilaciones en dominio frecuencial puede proporcionar información vital de cara a una correcta identificación de las vibraciones que conforman el fenómeno vibratorio representado en el dominio temporal.

El principio matemático que permite realizar la transformación de una señal desde el dominio temporal al dominio frecuencial es el de la transformada de Fourier.

En la imagen que sigue a continuación se puede apreciar como la transformación a dominio frecuencial permite identificar diferentes frecuencias de vibración. Mediante un estudio más detallado de las mismas, será posible esclarecer las causas de éstas, así como valorar posibles planes de mitigación de sus potenciales efectos nocivos para el buen funcionamiento de la máquina.

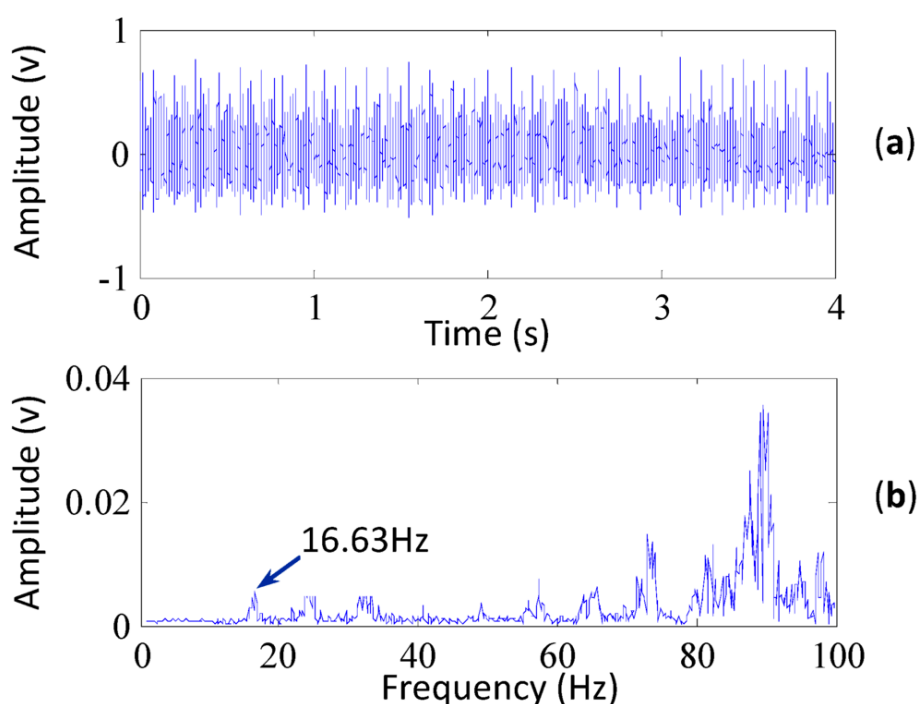


Figura 6.1 Ejemplo de señal representada en dominio temporal (figura superior) y en dominio frecuencial (figura inferior). *Google.com*

2.15. Caracterización de los fenómenos vibratorios

Precisamente de cara a una correcta calificación y cuantificación del fenómeno vibratorio a estudio se hace necesario poder identificar los parámetros que contribuyen a la

caracterización del mismo. Conviene destacar que una incorrecta identificación y parametrización de la vibración puede llegar a tener consecuencias fatales para la máquina debido a errores de diagnóstico de potenciales anomalías.

La siguiente figura se pueden observar los parámetros definitorios de un fenómeno vibratorio. Como comentado con anterioridad, la correcta caracterización de una señal en dominio temporal puede resultar de vital importancia para la identificación de anomalías de funcionamiento subyacente.

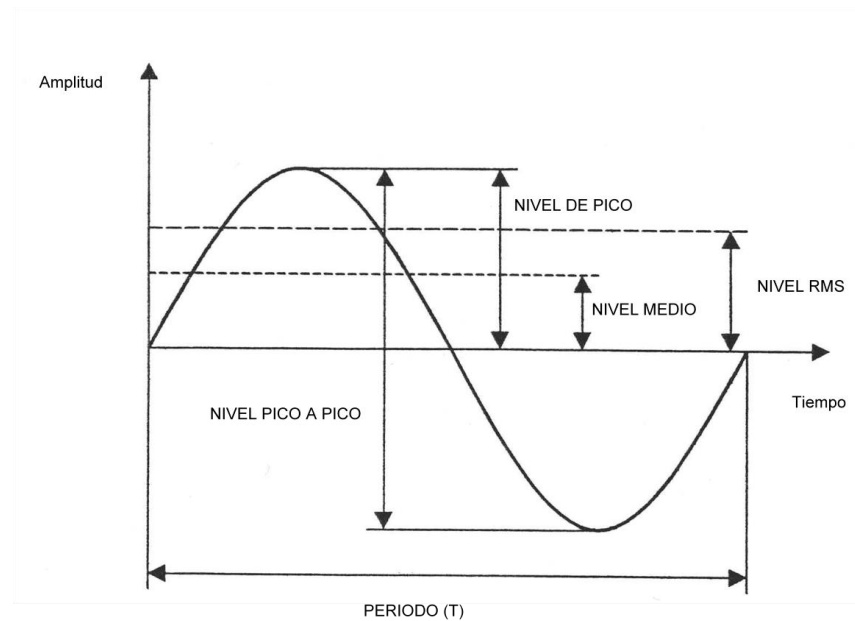


Figura 6.2 Caracterización de una señal sinusoidal con parámetros de referencia. *Google.com*

- Nivel de pico (valor) - útil para cuantificar el nivel máximo de la vibración.
- Nivel pico a pico (valor) - valor máximo de la amplitud de la señal. Sensible a eventualidades. En el evento de contar con un impacto, la magnitud del mismo se verá representada en el incremento del valor de pico a pico de la señal. En el contexto de los fenómenos vibratorios, puede ser indicativo de inicio de avería.
- Nivel medio (valor) - no encuentra traducción directa con elementos o comportamientos físicos por lo que, a menudo, suele no ser de utilidad. El método de cálculo de este parámetro se basa en la función de señal rectificada.
- Nivel RMS (valor) - se trata del valor eficaz de la señal (por sus siglas en inglés, Root Mean Square). Se trata a su vez, de uno de los indicadores de referencia para la caracterización del fenómeno vibratorio debido a que éste viene relacionado con la energía contenida en la vibración.

Tipologías de monitorización

El término monitorización, también referido en ocasiones como monitoreo, hace referencia a la acción de realizar lecturas del comportamiento de objetos, maquinaria o procesos con el fin de conocer el estado de éstos.

Pese a que las opciones disponibles en el mercado son variadas (sin ser la industria de este estudio una excepción) se podría considerar como extendida la práctica de ofrecer soluciones que con niveles de análisis y procesamiento de los datos integrados en los propios aplicativos.

2.16. Monitorización off-line

Es este método suele verse limitado a maquinaria no crítica (que no cuente con sistemas de monitorización de lectura continua o estacionarios).

Utilizado para la inspección puntual de maquinaria, este método, consiste en realizar mediciones de los sensores mediante equipos considerados móviles o no-estacionarios. Estos equipos, de composición variable, suelen ser de tamaño reducido para permitir un manejo adecuado - no supongan un peso o volumen excesivo para su traslado - a la vez que ofrecen prestaciones similares a las que se pueden encontrar en soluciones fijas.

Tan solo a modo ilustrativo, en el mercado actual se pueden encontrar multitud de soluciones que cumplan con las prestaciones anteriormente mencionadas. Algunos ejemplos se listan a continuación:

- Sensores de temperatura
- Sensores de vibraciones
- Sensores acústicos

Este tipo de soluciones no serán tomadas en consideración en este estudio.

2.17. Monitorización on-line

Se trata del método que puede proporcionar mayor valor añadido dado que permite contar con el detalle de las mediciones de forma continua con la frecuencia deseada. Es importante notar, así mismo, que dependiendo de las variables que se quieran monitorizar, los requerimientos de frecuencias de muestreo podrán variar. Como se verá en los apartados específicos de detalle de las soluciones a estudio, las frecuencias de muestreo pueden

llegar incluso a ser configurables (a través de los aplicativos de configuración de los equipos).

Si bien el principio de la monitorización on-line consiste en proporcionar lecturas de funcionamiento de máquina de forma continua y en *tiempo real* será igualmente importante notar que, además de frecuencia de muestreo de las variables, el carácter síncrono toma vital importancia de cara a poder establecer correlaciones o relaciones de causalidad entre fenómenos.

A tal y efecto, y a modo quizá más ilustrativo, si se obtienen lecturas de diferentes sensores en instantes de tiempo diferentes, no se podrá establecer una relación entre fenómenos. Así, de cara a poder ofrecer soluciones con prestaciones competitivas, se requiere poder garantizar el correcto muestreo de los fenómenos vibratorios. Es por ello que es habitual encontrar en diversas soluciones de mercado módulos específicamente diseñados para guardar sincronización entre las partes.

Condition Monitoring

2.18. Introducción

El término que lleva como título este capítulo hace referencia a lo que, en la actualidad, se considera una de las estrategias más efectivas de cara a garantizar la salud de maquinaria en cualquier proceso productivo.

Si bien se suele hacer referencia al *Condition Monitoring* como una estrategia o metodología de monitorización, lo cierto es que a menudo se puede considerar que éste, a su vez, se divide en dos grandes tendencias: *Trend Monitoring* y *Condition Checking* [3].

2.19. Monitorización de tendencias

Pese a que este término es originalmente acuñado en inglés (*Trend Monitoring*) y referido en la industria a menudo como tal, en ocasiones, se puede encontrar *Monitorización de Tendencias* como la traducción del término al castellano.

Sin importar el idioma con el cual se haga referencia a este método, lo cierto es que resulta clara la comprensión de la estrategia que sigue: monitorizar la tendencia de funcionamiento de la máquina a estudio. Mediante el seguimiento de los parámetros críticos, se puede lograr la identificación de determinados comportamientos que podrían estar conduciendo a una rotura de la máquina.

Si bien este tipo de monitorización permitirá realizar el seguimiento de la máquina y proporcionar avisos con cierta antelación, es así mismo indispensable controlar que el nivel de los avisos generados no impacte de manera significativa la disponibilidad de la máquina.

A modo de ejemplo: un nivel de avisos demasiado “bajo” puede acarrear un número de paradas más elevado del deseado (con el consecuente coste económico). Por el contrario, un nivel de avisos demasiado “alto” podría llegar a acarrear incluso fallos, dado que los disparadores (avisos, alarmas) contarían con una sensibilidad demasiado cercana a la de la rotura.

Como en tantos otros campos, lo ideal será condicionar el salto de estos avisos o alertas a rangos de valores cuya sensibilidad permitan realizar una operación y mantenimiento ajustadas con las capacidades de los equipos técnicos (personal cualificado encargado en última instancia de realizar las paradas controladas y las tareas de mantenimiento en su conjunto).

En la figura que se muestra a continuación se puede observar lo que se detalla en los párrafos anteriores. A modo de descripción, los elementos o conceptos interesantes que se hallan en esta gráfica (cuyo contenido se encuentra en inglés) se describen igualmente a continuación:

- *Shutdown*: instante en el que se produce el fallo de la máquina.
- *Lead Time*: se conoce como el intervalo en el que se cuenta con indicadores suficientes para anticipar que se puede estar entrando en fallo.
- *Alarm*: en el gráfico se proporciona una descripción cualitativa del instante en el que podría tener lugar el salto de un aviso. Como se ha comentado con anterioridad -y aparece indicado en el propio gráfico- el correcto posicionamiento de los niveles de aviso será crítico para poder realizar un correcto mantenimiento de la maquinaria.

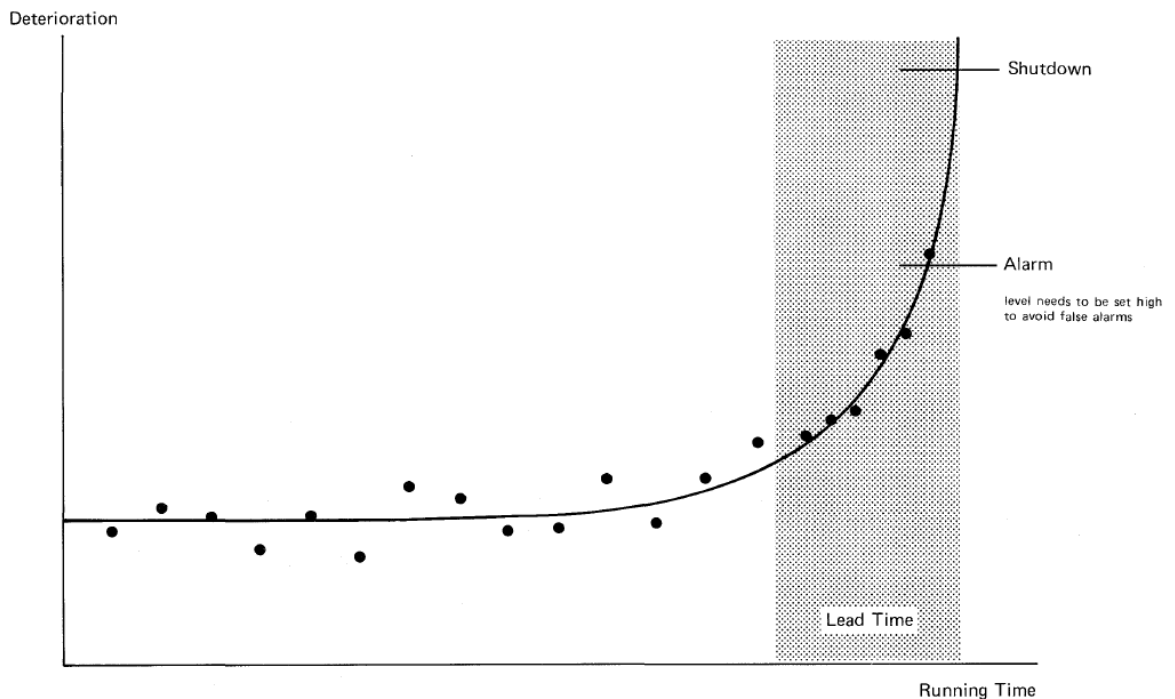


Figura 8.1 Curva característica de la evolución del deterioro de una máquina en función del tiempo de operación [3]

2.20. Comprobación de Condiciones

Como en el caso del *Trend Monitoring* el término es generalmente referido en inglés (*Condition Checking*). Si se realiza el ejercicio de traducción al castellano, no obstante, éste podría ser descrito como *Comprobación de Condiciones*.

A diferencia de la estrategia basada en el análisis de tendencias (*Trend Monitoring*) esta estrategia se basa en el conocimiento de la propia máquina para detectar variaciones anormales de parámetros en operación.

Es precisamente el conocimiento (mediante el análisis histórico de las condiciones monitorizadas con antelación) lo que ayudará a determinar si el funcionamiento de la máquina en esas condiciones se ajusta al comportamiento de ésta descrito con anterioridad en condiciones similares.

Si bien esta estrategia proporciona un análisis de la máquina monitorizada, se considera que presenta limitaciones importantes dado que se basa en la existencia de una serie histórica adecuada y fiable para poder determinar el grado de desviación de las condiciones medidas respecto del comportamiento ideal. No será posible por tanto, determinar si existe desviación en las condiciones de trabajo en el instante de inicio de la monitorización (a diferencia de con el método del *Trend Monitoring*).

Pese a que esta técnica obtiene uno de sus mayores fuertes precisamente en el alto grado de *personalización* en la caracterización de lo que se consideran condiciones de operación normal para una máquina en concreto, este método puede ser utilizado para comprobaciones en maquinaria de reciente instalación contra valores observados en maquinaria anteriormente instalada y en operación como guía. Esta solución pretende tratar de cubrir la falta de serie histórica en la observación en los primeros centenares de horas de operación.

2.21. Condition monitoring: ventajas

A modo resumen, las ventajas que la implantación de sistemas de *Condition Monitoring* pueden aportar para la mejora del mantenimiento de equipos industriales (maquinaria crítica en procesos productivos, maquinaria rotativa intensiva en capital u otros ejemplos similares) se encuentran, primordialmente alineadas con las que se han podido describir en el apartado del mantenimiento predictivo.

La adopción de estas estrategias permite la anticipación a posibles paros, roturas o fallos de máquina basándose en la detección precoz de los síntomas que preceden al evento pudiendo así permitir una mejor gestión de los recursos con los que los equipos de mantenimiento puedan o deban contar.

Estructura requerida

Si bien el *Condition Monitoring* supone un cambio de paradigma en la industria por el alto grado de conocimiento que ofrece de la máquina sobre la cual se realiza el seguimiento, cabe notar que su implementación requerirá de cierta infraestructura.

Adicionalmente, en el caso de la tipología de proyectos a estudio, el grado de complejidad de la infraestructura puede verse igualmente condicionado por requerimientos del operador de parque así como de la compañía de distribución eléctrica. Estos requerimientos, pueden incluir, pero no estar exclusivamente sujetos a:

- Disponibilidad de acceso a equipos cercanos al 100%;
- Posibilidad de acceder a la totalidad de los datos desde el inicio de la monitorización con la finalidad de realización de auditorías (igualmente interesante de cara a realizar informes y análisis para la mejora continua de mantenimiento);
- Posibilidad de controlar:
 - Potencia Activa vertida a red;
 - Potencia Reactiva vertida a red;
 - Factor de potencia vertido a red;

El esquema o figura que se presenta a continuación pretende ilustrar la infraestructura necesaria para realizar un control y monitorización que se podría considerar como la ideal o completa. La infraestructura viene descrita mediante bloques que representan las diferentes capas del sistema.



Figura 9.1 Diagrama de bloques representativo de las capas de elementos necesarias para llevar a cabo *Condition Monitoring* en un aerogenerador.

Si bien el diagrama anterior ofrece un listado de las capas que se podría considerar como una ejemplificación del estado del arte de la industria, es importante notar que no todos los componentes serán necesarios para llevar a cabo la monitorización y el mantenimiento de parques eólicos. A fin de poder detallar el grado de criticidad de las capas detalladas anteriormente, los sub-apartados que siguen ofrecen breve detalle de la utilidad y componentes que las conforman.

2.22. Transductores

Capa indispensable para poder realizar la monitorización. En esta capa se generan las señales que se quiere monitorizar.

Los transductores, por tanto, son elementos de medición de las señales. Pese a que en este bloque se pueden encontrar multitud de ejemplos de diferentes tipologías de transductores,

este estudio tan sólo contemplará la necesidad de instalar elementos de medición de señales vibratorias, como se podrá encontrar en el capítulo de elementos de medición.

Cabe destacar que las necesidades del número y tipología de los transductores a instalar, dependerá de los requerimientos del proyecto: condicionando así las necesidades y requerimientos de las capas posteriores.

2.23. Capa comunicación (transductor - equipos locales)

Capa indispensable para poder realizar la monitorización. En esta primera capa de comunicación se logrará trasladar la información generada en los elementos de medición hasta la capa de equipos locales encargados de su procesamiento.

Cabe destacar que en el mercado se pueden hallar soluciones que se ajusten a diferentes requerimientos, así:

2.23.1. Soluciones mediante cableado

Se trata de una solución que presenta menor grado de potenciales limitaciones técnicas dado que se basa en la comunicación por cable , tradicionalmente más segura y fiable.

Esta solución, como contrapartida, presenta unos costes de instalación asociados que pueden resultar poco atractivos, dado que se hace necesario cablear la totalidad del interior de la góndola, así como la distancia desde el punto de medida (donde se instala el transductor) hasta el equipo de procesamiento de señales local.

2.23.2. Soluciones mediante conexión inalámbrica

Este tipo de soluciones suelen resultar más atractivas dado que permiten ahorrar la instalación de cableado desde el/los transductor/es hasta los equipos de procesamiento de señales local. Si bien existen soluciones en el mercado, no se contempla un análisis exhaustivo en este estudio.

2.23.3. Soluciones híbridas

Si bien la adopción de esta solución para la totalidad de los transductores monitorizados puede resultar en un coste excesivo y llegar incluso a condicionar la fiabilidad de la instalación, existiría la posibilidad de adoptar soluciones híbridas.

Estas permitirían hacer uso de las ventajas que ofrecen las conexiones inalámbricas (para los transductores que presenten un acceso más complicado) en conjunción con las que ofrecen las conexiones mediante cableado (donde el acceso para realizar la instalación no resulte un inconveniente).

2.24. Equipos de procesamiento locales

Capa indispensable para poder realizar la monitorización. Ésta debe proporcionar la capacidad de procesamiento de las señales procedentes de los sensores. Como se comentará en el capítulo 14 de este estudio, esta capa presenta un alto grado de personalización debido a su característica arquitectura modular. A menudo, se encuentran ejemplos en la industria con prestaciones que incluirían:

- Procesamiento, almacenamiento y envío al repositorio central de las señales medidas en la capa de transductores;
- Procesado y ejecución de instrucciones de control sobre máquina;
- Interficies locales para eventuales operaciones sobre máquina (el operador se desplaza físicamente hasta las inmediaciones del equipo);
- Sistemas de alimentación de emergencia;

2.25. Capa de comunicación aerogenerador-parque

Si bien es cierto que la monitorización y control de un aerogenerador no requiere que éste forme parte de un parque, el marcado carácter industrial de las soluciones que se presentan en este estudio tendrán como nicho de mercado proporcionar servicio a parques eólicos. Debido a la naturaleza y composición de estas agrupaciones de aerogeneradores, resulta más eficiente establecer un único nodo de comunicación con el exterior. Como norma general, por tanto, se requerirá establecer una línea de comunicación desde las n-góndolas de los n-generadores hasta lo que se podría denominar como caseta de control o centro de operaciones del parque. Una vez allí, se podrá establecer la conexión con el mundo exterior (vía internet).

Así, de cara a la realización de este tipo de instalaciones, se deberá tomar en consideración para el correcto dimensionamiento del número de metros de cable de fibra óptica necesarios:

- La distancia existente desde el punto de instalación en el interior de la góndola del equipo de procesamiento local hasta la torre;
- La distancia entre el punto de entrada del cableado en la torre hasta el punto de salida de éste en la base de la torre;

- La distancia entre el punto de salida del cableado en la base de la torre hasta la base de la torre del siguiente aerogenerador.

Como medidas de contención ante posibles disfunciones del cableado -deterioro del cableado, inclemencias meteorológicas que dañan la instalación, o fauna local, entre otros- puede resultar interesante pasar más de un cable de fibra por el interior de la vaina o cable. Esta medida permite contar con un sistema redundante ante la eventualidad de perder el canal principal.

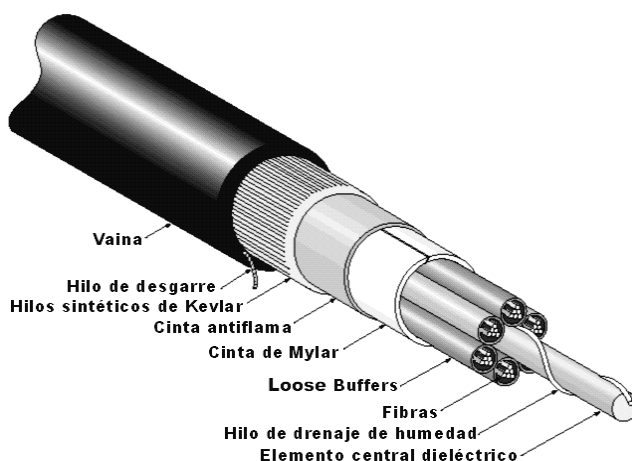


Figura 9.3 Esquema de cableado de fibra óptica con detalle de las partes que lo componen.

Google.com

Adicionalmente, de cara a poder garantizar la disponibilidad de la conexión, es habitual que se realicen instalaciones de cableado en anillo. Este tipo de soluciones, a pesar de que suponen un sobrecoste inicial -se deberá proceder a la tirada de un número de metros de cable mayor- proporciona mayor robustez.

De esta forma se logra conectar cualquier origen de señal -equipos de procesamiento locales- con el centro de análisis de datos o elemento de comunicación con el mundo exterior por dos caminos diferentes. Resulta fácil entender, por tanto, que una avería en el cableado de fibra óptica en un punto de terminado, no limitaría la posibilidad de establecer conexión con el aerogenerador dado que cualquier elemento del sistema está conectado a través de dos caminos.

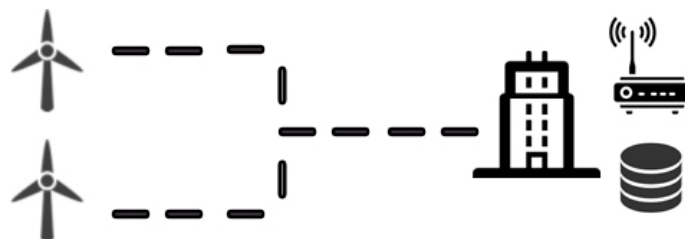


Figura 9.4 Esquema ilustrativo de una posible disposición en anillo del cableado de comunicación aerogenerador-parque

Sobre las líneas anteriores, pese a no ser parte de este estudio, resulta interesante destacar la existencia de sistemas detección de averías en el anillo. Estos sistemas, como cabría esperar, permitirán alertar del punto o conjunto de puntos en los que se ha producido la avería o fallo.

2.26. Almacenamiento datos (parque)

En este apartado es conveniente mencionar la relativa sensibilidad de los datos que se pretenden almacenar a partir de la monitorización de aerogeneradores. Es posible que, dependiendo de la naturaleza de los requerimientos de la propiedad de los equipos, del operador del parque o de la autoridad reguladora competente, exista la necesidad de ofrecer soluciones que garanticen el acceso a los datos en todo momento y que se conserve valores históricos de cierta antigüedad.

2.27. Procesamiento y análisis de datos local (parque)

Como se ha mencionado en los puntos anteriores, es posible que determinadas instalaciones cuenten con estructuras que permitan realizar una centralización de los servicios de almacenamiento de datos para su posterior envío a la nube. En determinadas disposiciones de parque, será posible encontrar instalaciones que permitan realizar el control *in-situ* por parte de los equipos mantenedores del parque. A menudo, estas instalaciones reciben el nombre de Centros de Control.

En los centros de control, se podrá encontrar:

- Personal cualificado que cuente con la experiencia y los conocimientos para realizar operaciones de mantenimiento sobre las máquinas del parque;
- Personal cualificado que cuente con los conocimientos técnicos y analíticos para la operación de las herramientas de análisis y diagnóstico de maquinaria;

Si bien la mayoría de las soluciones que se ofrecen en el mercado a día de hoy no tienen limitaciones a la hora de ofrecer el acceso a datos (muchas ofrecen acceso desde un navegador web como si del acceso a una mera aplicación de correo se tratara), es conveniente resaltar el valor añadido que localizar personal cualificado en el interior del propio parque supone. Esta opción aporta versatilidad y eficacia a la hora de ofrecer una respuesta inmediata en el momento en el que actuar con celeridad se convierte en una necesidad.

2.28. Capa comunicación parque-exterior

Se trata de la capa que proporcionará la capacidad de acceder a los datos que se están monitorizando en campo al mundo exterior. Como norma general, será necesario poder contar con, al menos, una de las infraestructuras que siguen:

- Conexión satelital. Probablemente más habitual en parques off-shore con dificultad de establecer otro tipo de conexiones.
- Conexión a red mediante el cableado hasta la comedia de red (rara vez posible debido al carácter aislado y remoto de los parques eólicos);
- Conexiones GPRS para la transmisión de las señales mediante tarifas de comunicación de datos ofrecidas por operadores de comunicación convencionales.

Esta capa puede no ser necesaria en el supuesto de que los requerimientos del proyecto no incluyan acceder a la operación del parque de forma remota.

2.29. Análisis y supervisión de activos central

Si se cuenta con multitud de proyectos diseminados por la geografía (sin descartar la operación y control de éstos de manera local) es habitual centralizar la supervisión de portfolio global desde un único emplazamiento.

Estos centros, cuyo emplazamiento no queda restringido a las inmediaciones del parque (se podría encontrar en centros urbanos), permitirían centralizar el análisis de los datos recepcionados en campo para la posterior toma de decisiones de cara a la mejora de las estrategias de mantenimiento con una adecuada planificación.

2.30. Almacenamiento de datos definitivo

Este apartado, nuevamente, dependerá de los requerimientos de disponibilidad de acceso a datos que puedan existir en función de garantías de fabricante, valor histórico o por motivos de auditoría. Precisamente por ello, es posible que se requiera hallar un emplazamiento

diferente (servidores que no se encuentren en el mismo lugar) con costes de mantenimiento más ajustados.

Alternativamente, si no resulta necesario contar con estos datos, convendrá proceder al borrado de estos como buena praxis para salud de la solución.

Transductores

Como comentado en el apartado anterior, los transductores son la primera capa del sistema de monitorización. Debido al alcance del problema tipo que forma parte de este estudio - y se describe en apartados posteriores - se centrará en la familia de transductores más habitual en la industria para la medición de vibraciones: acelerómetros piezoeléctricos.

2.31. Acelerómetros

Estos sensores, utilizados en multitud de aplicaciones industriales desde hace décadas, permiten medir, como su nombre indica, la aceleración de la vibración.

Si bien los acelerómetros permiten medir las magnitudes descritas anteriormente, existen diferentes variantes dentro de esta familia de dispositivos. Qué tipología de acelerómetro se deberá escoger dependerá, necesariamente, de las condiciones de trabajo a las que éste se vea sometido. Será importante notar en el momento de la toma de decisión de qué acelerómetro se deberá instalar entendiendo por condiciones de trabajo:

- Solicitaciones de trabajo relativas a la máquina medida (frecuencias, dimensiones de maquinaria, etc.);
- Condiciones de contorno de trabajo (temperaturas de trabajo);

2.31.1. Acelerómetros piezoeléctricos

Como mencionado anteriormente, se trata de la tipología que se encuentran con mayor facilidad en la industria debido a su gran versatilidad, precio, prestaciones y número disponible en el mercado. El principio de funcionamiento de los acelerómetros piezoeléctricos por compresión se basa en, como su nombre indica, la compresión de un disco piezoeléctrico. En el momento en el que se ejerce presión sobre esta superficie genera una deformación sobre el material piezoeléctrico - a menudo un disco de vidrio - que, a su vez, generará una carga eléctrica proporcional a la fuerza por unidad de superficie aplicada.

Como se aprecia en la figura adjunta, la composición de este tipo de dispositivos, permiten generar una salida analógica proporcional a la fuerza externa aplicada. Esta fuerza, en el contexto a estudio, será originada por la aceleración del fenómeno vibratorio originado en componentes del aerogenerador.

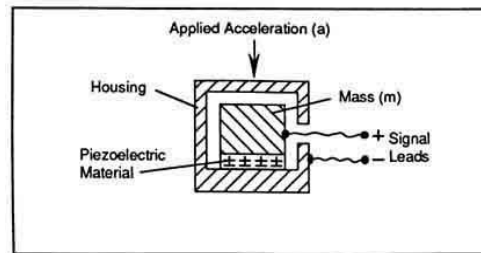


Figura 10.1 Esquema de transductor piezoeléctrico. *Google.com*

Estos sensores, cuya instalación se realiza sobre la carcasa de la maquinaria, se realizaría de la forma que se puede apreciar en las imágenes que siguen.



Figura 10.2 Ejemplo de acelerómetros CTC [4]

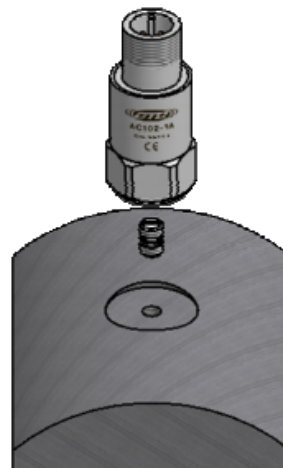


Figura 10.3 Ejemplo de instalación de acelerómetro sobre carcasa de máquina [4].

Equipos de procesamiento locales

Como se introducía en apartados anteriores, esta capa es la que presentará uno de los mayores grados de personalización. Nuevamente a modo de recordatorio, las necesidades de configuración podrán variar en base a los requerimientos de monitorización y control de cada proyecto.

2.32. Soluciones de arquitecturas modulares genéricas

Este tipo de instrumental, localizado en cabinas en las inmediaciones de la maquinaria, suele ser ofrecido en la industria a modo de solución modular. De esta forma, se pueden hallar soluciones que irán desde equipos genéricos para la monitorización y control de máquinas rotativas en general a productos específicos para la industria eólica que facilitan la configuración del producto final. Estas últimas a menudo ofrecen integraciones desde el inicio para mayor tranquilidad del instalador.

Así pues, este tipo de soluciones modulares, a menudo contarán con la posibilidad de configurar el equipo incluyendo algunos de los módulos detallados a continuación:

- Fuentes de alimentación: dependiendo de la criticidad de la instalación, puede resultar interesante disponer de sistemas de alimentación de seguridad o redundantes para reducir el riesgo de paro (*shutdown*);
- Módulos de protección de máquinas: específicos para las configuraciones de protección e integridad de las máquinas que podrán contar, a menudo, con sistemas de alarma precargados en función de la máquina que estén protegiendo;
- Módulos de relés: habilitando la posibilidad de realizar operaciones ante eventuales necesidades de paro o modulación de condiciones de máquina desde esta capa;
- Módulos de monitorización de condiciones: sistemas paralelos para el procesamiento independiente del ofrecido por el módulo de protección, permitiendo configurar diferentes niveles de análisis y diagnóstico;
- Módulos de conexión USB: con la finalidad de poder ofrecer un punto de configuración avanzado de módulo. Mediante esta entrada, se puede acceder a la configuración del equipo desde computadores portátiles que cuenten con herramientas específicas para cargar o alterar configuraciones;
- Módulo de interfície de usuario: permitiendo la instrucción manual de determinadas configuraciones y mantenimiento general del equipo. Interesante en situaciones en las que se requiera realizar comprobaciones o actuaciones de cierta criticidad con celeridad (generalmente estas interfícies contendrán un número limitado de funciones - suelen ser de fácil manejo/uso).

Como comentado anteriormente, este tipo de equipos, de marcada arquitectura modular, podrán a su vez formar parte de una disposición todavía mayor, habilitando la posibilidad de realizar la monitorización y protección de máquinas de gran tamaño operando en consonancia con otros módulos. Si esta es la configuración necesaria, es probable que se requiera de la instalación de módulos específicos para la sincronización con otros chasis/módulos.

Así, dependiendo de los requerimientos de determinadas aplicaciones, podrá ser necesaria la instalación de más de un equipo en formato rack, para poder dar servicio a las particularidades de mantenimiento de esa máquina o conjunto de máquinas. Debido al alcance de este proyecto, este no será el caso.



Figura 11.1 Ejemplo existente en la industria en el que se puede apreciar la disposición modular.
National Instruments.

2.33. Soluciones de arquitecturas modulares especializadas

Este grupo de soluciones, pese a que se podría considerar igualmente modular, tiene la particularidad de contar con soluciones enteramente localizadas para la industria eólica. Estas soluciones, a menudo, vienen de la mano de actores consolidados en sectores industriales que guardan cierta relación con la industria eólica (fabricantes de rodamientos, fabricantes de transductores en general y de otros aplicativos para maquinaria rotativa) que ofrecerán, como extensión a su oferta comercial existente, soluciones específicas para la industria eólica.

Se trata de productos diseñados específicamente para poder proporcionar soluciones *end-to-end* enteramente localizadas al sector. Éstas serán incluso vendidas de forma compacta a modo de armarios.

Herramientas de análisis y diagnóstico de señales

En este apartado, nuevamente, resulta necesario poner en conocimiento del lector la gran variedad de soluciones que se pueden encontrar en el mercado.

Si bien en el apartado anterior se ha podido apreciar que el número de actores en el mercado viene condicionado por la posibilidad de ofrecer productos físicos que puedan ser integrados con la capa de transductores. Con la necesidad añadida de ofrecer prestaciones para operación local (*in-situ*). En este caso, debido a que se trata de soluciones de *software*, el número de actores se ve incrementado.

Tanto es así, que se podrán encontrar proveedores que ofrezcan soluciones de monitorización que cuenten con integración con equipos locales de terceros. Estas soluciones no formarán parte de este estudio debido a la escasa presencia de éstas en la industria.

Las soluciones que se consideran más robustas, por tanto, serán aquellas que ofrecen versatilidad *end-to-end*: software y hardware diseñados por la propia casa o fabricante. Estos tandems, a menudo, ofrecerán al instalador la tranquilidad de contar con suficientes garantías de funcionamiento. Esta tranquilidad, así mismo, se verá reforzada y extendida en las circunstancias de verse ante la necesidad de realizar actualizaciones de *software* o *firmware* de los diferentes componentes del equipo.



Figura 12.1 Imagen característica de centro de operaciones de un parque eólico. *Google.com*

Como comentado con anterioridad, la decisión de optar por una solución *end-to-end* reduce los riesgos de encontrarse ante la necesidad de realizar tareas de personalización de la solución adicionales a lo largo de la vida útil de algunos de los componentes. A modo de ejemplo, la actualización del equipo de procesamiento local a un modelo que no presente

una compatibilidad total con el modelo anteriormente instalado, podrá requerir trabajos adicionales de cara a conseguir la integración del nuevo conjunto. Estos trabajos podrían incluir una revisión de los protocolos de comunicación y/o procesamiento de datos en la capa de diagnóstico y análisis.

Si se toman las soluciones *end-to-end* como las que, a priori, presentarán más garantías de fiabilidad para proyectos cuya vida útil se planifica larga, convendrá tomar en consideración las capacidades que las herramientas de análisis *-software-* ofrecen. Así mismo, es importante tomar en consideración el historial de actualizaciones que se ofertan por parte de los fabricantes. Si se trata de herramientas que se encuentran en evolución continua y que incorporan avances en las técnicas de análisis o, por el contrario, se trata de soluciones que no suelen incorporar mejoras y deberán ser utilizadas con las funcionalidades disponibles en el momento de la implementación del proyecto.

Este hecho puede ser condicionante debido a la potencial asimetría entre proyectos: si se cuenta con -o se pretende pasar a contar con- diferentes proyectos repartidos por la geografía mundial. Si la consolidación y análisis de los datos se realiza desde un emplazamiento centralizado, no contar con las mismas versiones de software -al igual que de equipos de adquisición locales y/o transductores- podría resultar en un análisis no equilibrado de los equipos. Este hecho se daría, debido a la no homogeneidad de los datos recibidos o tratados desde campo (equipos de adquisición locales).

Así mismo, y de manera análoga, pese a que se considere menos habitual, la situación descrita en el párrafo anterior se puede dar en el mismo emplazamiento (parque eólico) en diferentes instantes de la vida útil del proyecto. Haciendo extensible a prácticamente la totalidad de los proyectos la necesidad de contemplar con la prioridad y atención adecuada las implicaciones de optar por una opción de mercado u otra.

Caracterización del caso a estudio

Con la finalidad de simplificar y acotar las diferentes alternativas que se detallarán en el capítulo 14, se tomará como ejemplo la monitorización de una máquina tipo.

Debido al alcance de este estudio, en el que se pretende realizar la monitorización de los fenómenos vibratorios originados en determinados componentes presentes en un aerogenerador, un primer acercamiento al problema podría la colocación de los sensores como se indica en la Figura 13.1.

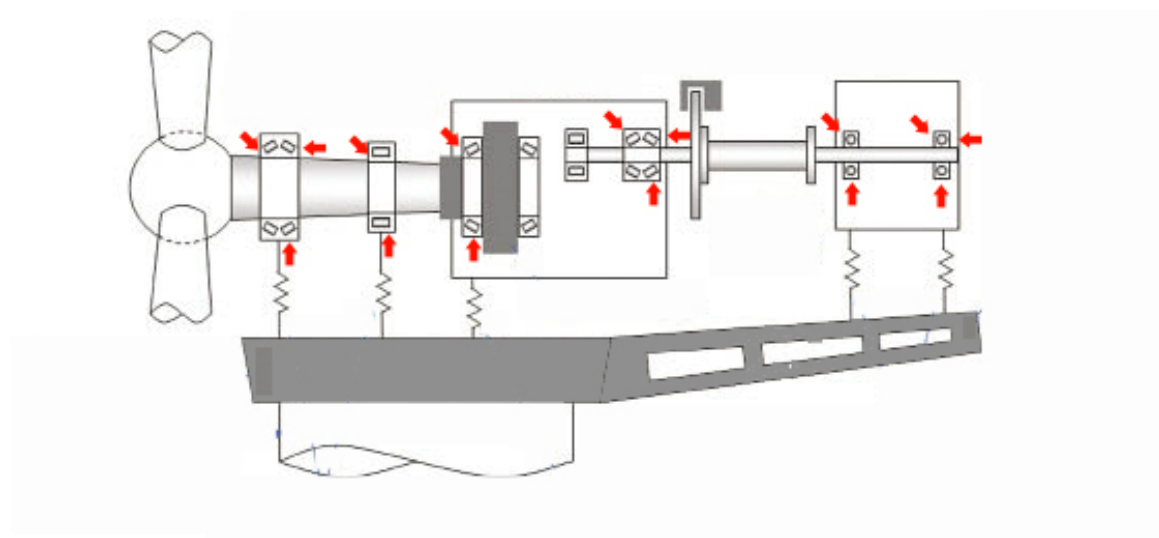


Figura 13.1 Esquema simplificado del aerogenerador con detalle de localización de acelerómetros en una disposición ideal.

Siendo los acelerómetros los indicados con el cursor rojo en la Figura 13.1. Así, con esta disposición, los componentes críticos del aerogenerador quedarían monitorizados como se detalla en la tabla que sigue.

Generador	5 sensores. Dos parejas de sensores verticales y perpendiculares al plano (representados en diagonal en la figura superior) más uno en la misma dirección del eje de rotación.
Multiplicadora	5 sensores. Dos parejas de sensores verticales y perpendiculares al plano (en el lado de alta y lado de baja

	velocidad) más uno en la misma dirección del eje de rotación.
Rodamiento ^(*)	5 sensores. Dos parejas de sensores verticales y perpendiculares al plano, más uno en la misma dirección del eje de rotación.

Tabla 13.1 Esquema instalación sensores

Si bien con esta disposición, con un total de 15 sensores situados en los componentes críticos anteriormente descritos, se podría conocer con una precisión mayor el estado del aerogenerador, convendría tomar en consideración los sobrecostes que esta decisión podría acarrear.

2.34. Justificación localización transductores

Como se verá en los apartados que siguen, el encarecimiento de las soluciones debido a la proliferación en la instalación de sensores puede resultar determinante a la hora de escoger una u otra disposición. Es habitual encontrar que las soluciones de monitorización ofrezcan canales con números múltiplos de 4 (4, 8, 16). Así, debido precisamente a esta condición, se opta por proporcionar la siguiente disposición de sensores.

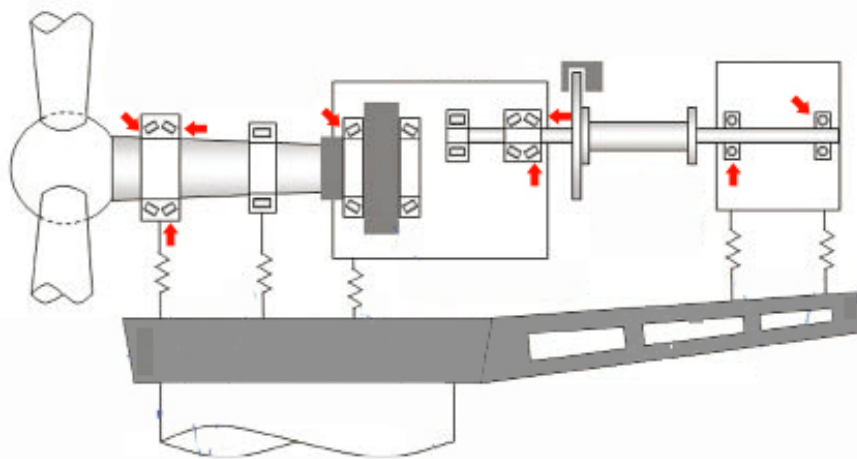


Figura 13.2 Propuesta de instalación de sensores con vistas a proporcionar ahorro en la conformación de la solución de adquisición de señales

De esta forma, el detalle de sensores a instalar, quedaría conformado de la siguiente forma.

Generador	2 sensores. Perpendicular al eje y en perpendicular al plano
Multiplicadora	3 sensores. Uno en misma dirección que el eje (en lado de bajas revoluciones) y otros dos en perpendicular a este.
Rodamiento ^(*)	3 sensores. Todas las direcciones en el rodamiento principal (en la dirección del eje, perpendicular al plano y perpendicular)

Tabla 13.2 Esquema instalación sensores en solución más económica

^(*) En la figura 13.1 y 13.2 se representan dos rodamientos, si bien puede darse la situación de contar con tan solo un rodamiento.

Esta disposición, por tanto, permitirá pasar de monitorizar 15 señales a tan solo 8.

2.35. Caracterización de la máquina a estudio

A modo de maquina tipo, así mismo, se toma de un modelo de diseño y fabricación a cargo del grupo industrial GAMESA, en concreto, el modelo G114 2.5MW.

En la tabla que sigue se listan algunas de las especificaciones más representativas facilitadas por el fabricante.

Bloque	Detalles
Rotor	<p>Diametro: 114m</p> <p>Área de barrido: 10,207 m²</p> <p>Velocidad de giro: 7,7 – 14,6 rpm</p>
Palas	<p>Número de palas: 3</p> <p>Longitud: 56m</p> <p>Material: Fibra de vidrio reforzada</p>
Torre	<p>Tipo: Modular</p> <p>Altura: Según emplazamiento (hasta 125m)</p>

Multiplicadora	Tipo: 2 etapas planetarias + 1 etapa de ejes paralelos
	Ratio: 1:129,7
Generador	Potencia nominal: 2,5 MW
	Tensión: 690 V AC
	Frecuencia: 50 Hz

Tabla 13.3 Especificaciones para aerogenerador G114 2.5 MW [5]

2.36. Caracterización de emplazamiento del parque eólico

Si bien cada proyecto contará con particularidades que condicionarán la solución final, se reduce la propuesta de estudio a una instalación *on-shore* (parque eólico en tierra).

Pese a que no se realice una caracterización de un emplazamiento físico real, se considera que la solución del parque se realizará en tierra firme de cara a no contemplar las particularidades que un emplazamiento en aguas abiertas (*off-shore*) tendría.

2.37. Prestaciones de los sensores de referencia

2.37.1. Acelerómetros

Debido a las necesidades de realizar las mediciones sobre elementos tanto en el lado de altas revoluciones por minuto - generador - como en el lado de bajas revoluciones por minuto - rodamiento eje principal, se podría optar por contar con los siguientes transductores.

Generador	Acelerómetros de uso general (0,5-15kHz)
Multiplicadora (lado alta)	Acelerómetros de uso general (0,5-15kHz)
Multiplicadora (lado baja)	Acelerómetros de baja frecuencia. (0,2 -3kHz)
Rodamientos eje principal	Acelerómetros de baja frecuencia. (0,2 -3kHz)

Tabla 13.4 Propuesta requerimientos para sensores [4]

Soluciones existentes en el mercado

En este capítulo se presentarán las diferentes soluciones analizadas resaltando algunas de las particularidades que las diferencian o definen.

2.38. SKF

2.38.1. Breve historia la compañía

El fabricante SKF -cuyas siglas responden a Svenska Kullagerfabriken AB- cuenta con dilatada experiencia en diferentes sectores en la industria. Su ilustre fundador sin ir más lejos, Sven Wingquist, inventor del rodamiento de dos hileras de bolas auto-alineables, logra patentar el ingenio a los pocos meses de la fundación de la empresa (1907) consiguiendo exportar la patente del mismo a un total de 10 países.

El Siglo XX se convierte en etapa prolífica para la compañía que crece hasta los 40000 empleados en las primeras décadas de existencia. Sin abandonar sus orígenes en el sector de la maquinaria rotativa (donde les siguen otras patentes), expande sus dominios por otros sectores. Esta expansión llegará de la mano de la adquisición de compañías en diferentes países, así como del crecimiento de filiales no necesariamente vinculadas al negocio principal.

Quizá el ejemplo que ms pueda llamar la atención, por significativo a la par que curioso, sea el del grupo AB Volvo. El reconocido fabricante a nivel mundial de automóviles y camiones forma parte del grupo SKF hasta el año 1935, cuando se consolida como empresa independiente.

La presencia de SKF como proveedor de soluciones para la monitorización de condiciones de trabajo en aerogeneradores vendrá marcada, por tanto, por la clara experiencia y *know how* del grupo en relación al comportamiento de los rodamientos.

2.38.2. SKF: Una solución *end-to-end*

La solución que presenta SKF, puede ser considerada como una de las más atractivas debido al alto grado de localización con el que cuenta. En este contexto, conviene aclarar al lector al lector la definición del término localización es referido a la característica no genérica o adaptada de la solución.

Se trata, por tanto, de una solución diseñada para solucionar problemas específicos de la maquinaria rotativa no como partes de un sistema genérico que pueden llegar a adaptarse

al proyecto que se desee con mayor o menor nivel de personalización. Se podría afirmar, por tanto, que SKF apuesta claramente por las oportunidades que el sector eólico ofrece para comercializar soluciones específicas para el ejercicio de la operación y mantenimiento de activos eólicos.

Esta solución, como se indica en el esquema que sigue -que por otro lado estará presente en otros actores de la industria- presenta diferentes capas que podrán contar con la capacidad de comunicarse con instrumental de otros fabricantes. Este punto, como no podría ser de otra manera, requerirá de la atención específica y consultoría acreditada en cada caso.

En líneas generales, no obstante, la integración con otros sistemas de control o procesamiento diferentes de los desarrollados por SKF será siempre posible a través de la integración por OPC (*OLE for Process Control*, por sus siglas en inglés).

2.38.2.1. Equipo de procesamiento SKF IMx-W

Se trata del equipo de procesamiento de datos local propuesto por SKF.

Sus acabados y dimensiones, empaquetados en el interior de un armario o caseta al uso, están diseñados para su emplazamiento en el interior de la góndola. Como se puede apreciar en los anexos el detalle de sus dimensiones permite que su manejo, instalación y eventual modificación de ubicación se puedan realizar con normalidad y sin complicaciones.

Como comentado con anterioridad, se trata de una solución localizada que, como se podrá comprobar en los sub-apartados que siguen, ofrecerá una ventaja en la facilidad de instalación y puesta a punto.



Figura 14.1 Montaje del armario sobre pared de SKF IMx-W

La tabla que sigue muestra algunas de las prestaciones que resultan más representativas de esta solución:

Numero entradas analógicas	16 canales.
Numero de entradas digitales	2 canales.
Lectura simultánea de canales	Si. Integrado. Con la posibilidad de que las frecuencias de muestreo de las señales sean diferentes.
<i>Output Relay Driver</i>	Si. Integrado.
Almacenado de datos en circunstancia de no comunicación	Si. Integrado.
Detección automática de fallos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fallo en sensores ▪ Fallo en cable ▪ <i>Auto-testing</i>

Tabla 14.1 Prestaciones del procesador SFK IMx-W [6]

Adicionalmente, cuenta con un sistema de protección para neutralizar las descargas eléctricas que pueden darse durante tormentas eléctricas.

En el capítulo de la conectividad, la tabla que sigue ilustra la oferta disponible:

Puerto(s) Ethernet	100 Mbit. RJ45, TCP/IP. (x2)
Buses de comunicación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bus CAN ▪ RS485 (Modbus) ▪ RS232

Tabla 14.2 Prestaciones de comunicaciones procesador SFK IMx-W [6]

2.38.2.2.WindCon

Se trata de la solución adaptada a las necesidades de un entorno eólico propuesta por SKF.

Se podría considerar una extensión de la plataforma *SKF @ptitude Observer* -plataforma que integra la totalidad de las herramientas de procesamiento del fabricante. Específicamente localizada para aplicaciones eólicas.

Basada en una arquitectura convencional de cliente/servidor desarrollada para entornos Windows XP, esta plataforma cuenta adicionalmente con la posibilidad de ser accesible a través de *WebCon* -un *Web Server* convencional accesible a través de internet- mediante instancias de navegador de internet.

Esta alternativa permitirá remover la limitación de establecer una conexión contra terminales del mismo dominio o la necesidad de establecer conexiones .rdp desde computadoras que operen con sistema operativo Windows.

Como características principales, *SKF @ptitude Observer* -y sus módulos localizados *WindCon*- ofrecen una solución transversal sin necesidad de realizar configuraciones avanzadas. En cierta medida, se trata de uno de los productos más interesantes de la industria tanto en cuanto ofrece un buen equilibrio entre prestaciones y configuraciones pre-cargadas. La lista que sigue lo ejemplifica.

Herramientas graficas	Graficado de valores, diagrama de Bode, graficado en tiempo real de amplitud, velocidad, diagramas polares, diagramas en 3 dimensiones, etc.
Sistema de alarmas	Posibilidad de configurar alarmas, posibilidad de accionar relés ante nivel de alarma seleccionado, etc.
Comunicaciones	Posibilidad de notificar (SMS/email) a usuarios interesados ante eventos (alarmas), posibilidad de comunicarse via OPC (lectura y escritura), etc
Informes	Posibilidad de extraer datos en formatos .pdf, .xlsx o .docx mediante la configuración de informes personalizados, o gracias a listado de plantillas precargados

Tabla 14.3 Listado de prestaciones *WindCon* [7]

2.38.2.3. Seguimiento remoto de activos

Adicionalmente, SKF ofrece la posibilidad de subcontratar los servicios de seguimiento remoto de los activos que estén siendo monitorizados a través de la solución *WindCon*.

Este servicio ofrece la posibilidad de no requerir de la contratación de equipos propios para la supervisión remota de las operaciones. Es importante notar, no obstante, que este servicio no elimina la necesidad de contar con equipos locales de reparación o inspección de la maquinaria en campo.

Debido a la naturaleza de las limitaciones que esta solución presenta, se considera que tan solo resultaría interesante adoptarla en proyectos de tamaño reducido. Probablemente el nicho de mercado para este apartado del servicio no sea para grandes operadores del sector, sino todo lo contrario: pequeños operadores que no puedan permitirse la existencia de este tipo de centro(s) para la monitorización y control remoto de su(s) activo(s).

2.38.3. SKF Wind - ajuste a problema tipo

Gracias a la versatilidad en las prestaciones que ofrece (posibilidad de integrar hasta 16 entradas + 2 salidas) se ajusta a los requerimientos del problema tipo indicado en apartados anteriores (8 señales de acelerómetros).

Debido al carácter localizado a la industria eólica que presenta esta solución, puede dar respuesta a prácticamente cualquier necesidad de monitorización de señal de los equipos que en un aerogenerador se puedan generar.

A modo de ejemplo, pese a que no sea parte de este análisis, el equipo podría, contar con entradas de anemómetros (ubicados en el exterior de la góndola). Estas lecturas son generalmente ofrecidas por equipos meteorológicos a través de señales digitales.

Adicionalmente, y como elemento diferenciador, esta solución se oferta con la posibilidad de contratar servicios remotos de seguimiento y control de los activos. Esta posibilidad eliminaría la necesidad de contar con personal propio para realizar estas tareas. Potencialmente interesante para proyectos de menor envergadura / número reducido de aerogeneradores.

2.39. National Instruments

2.39.1. Breve historia la compañía

National Instruments - NI en adelante -, fundada en el 1976 por Dr. James Truchard y Jeff Kodosky, cuenta en la actualidad con más de 7000 empleados en todo el mundo con sede central en Austin, Texas, EE.UU.

En estas 4 décadas de funcionamiento, quizá entre los hitos más remarcables se deban listar el lanzamiento de la plataforma *LabVIEW* en 1986 y, en el 2004, el lanzamiento del sistema de control integrado *CompactRIO*. Ambos suponen un marcado punto de inflexión en el desarrollo de la compañía puesto que permiten expandir el volumen de negocio a nuevas cotas. Su marcado carácter de plataforma abierta y personalizable (las soluciones propuestas por NI están encaminadas a ofrecer flexibilidad, en contraposición con las de otros fabricantes) confieren a NI una versatilidad difícil de equiparar en el mercado. Con pocas distinciones en diferentes sectores industriales.

2.39.2. NI: soluciones versátiles

Precisamente por este carácter abierto, la conformación de una solución para la monitorización de equipos en aerogeneradores se convierte en un *puzzle*. Dado que los equipos de procesamiento locales no se encuentran localizados para una industria específica, compañías que deban realizar la monitorización de diferente tipo de maquinaria pueden pensar en NI como un proveedor de confianza.

Como prueba de ello, el propio fabricante establece como punto de partida para este tipo de aplicativos su gama de productos denominada *C Series*. Para aplicaciones que requieran de soluciones más robustas, no obstante, se podría plantear el uso de los equipos *PXI*.



Figura 14.2 Chasis C Series



Figura 14.3 Chasis PXI

C Series	PXI
<ul style="list-style-type: none">• Frecuencias de muestreo >50kS/s (por canal)• USB, Ethernet, WiFi o procesador de control/chasis integrado• Portátil o instalación fija• 3-256 canales de medida (dependiendo de módulos integrados en chasis)	<ul style="list-style-type: none">• Alto rendimiento y procesamiento• Elevado número de canales (500+)• Ethernet, Modbus, RS232 y otros buses industriales• Frecuencias de muestreo de > 200kS/s (por canal)

Tabla 14.4 Listado prestaciones procesadores NI

Debido a la naturaleza del problema tipo a estudio se considera que las soluciones englobadas en la *C Series* ofrecen las prestaciones necesarias para realizar la monitorización de los sensores requeridos.

Con la vista puesta en posibilitar la monitorización de los elementos contemplados en el problema tipo, NI cuenta con el módulo *NI 9232*. Este módulo, como se indica a continuación, cuenta con hasta 3 entradas analógicas. Así, dados los requerimientos de contar con hasta 8 acelerómetros como propuestos en el problema tipo, se hará necesaria la adquisición de 3 módulos *NI 9232*. A continuación se listan algunas de las características principales del módulo.

2.39.2.1.NI 9232



Se trata del modulo de adquisición de señal dinámica de la *C Series* para realizar medidas industriales de sensores piezoeléctricos electrónicos integrados (IEPE) y no IEPE con los sistemas desarrollados por NI *CompactDAQ* y *CompactRIO*.

Figura 14.4 Modulo NI 9232 en vista de perfil

Frecuencia muestreo por canal	102,4 kS/s
Temperatura de operación	-40 °C – 70 °C
Muestreo simultáneo	Si

Tabla 14.5 Listado prestaciones NI 9232 [8]

Si bien el fabricante ofrece multitud de combinaciones para conformar la solución a medida, la que sigue, con chasis y controlador autónomos e integrados, proporciona una plataforma flexible, autónoma y robusta.

2.39.2.2. NI cDAQ-9137 Controller



Figura 14.5 Chasis NI cDAQ-9137 Controller

Controlador que cuenta con la posibilidad de incluir hasta 8 módulos adicionales de la *C Series*. Esta familia de controladores, incorpora como parte de la oferta comercial APIs para LabView, ANSI C/C++, y Visual Basic .NET dotándolo de flexibilidad de cara a eventuales requerimientos de integración con otras plataformas o sistemas.

Procesador	Quad-core Intel Atom de 1,91GHz
Integraciones con módulos	> 60 módulos de E/S específicos de sensores con acondicionamiento integrado de señales
Conectividad	2 Puertos USB
	2 Gigabit Ethernet
	RS232 Serial
	Entrada de disparo y botón de usuario

Tabla 14.6 Listado prestaciones representativas NI cDAQ-9137 [9]

Adicionalmente, sacando partido a las ranuras que quedarían disponibles en este chasis, se podría barajar la posibilidad de completar la solución de monitorización mediante la inclusión de otros módulos compatibles.

De entre la variada oferta con la que cuenta NI, se podría optar por configurar un sistema con módulos:

- Medidores de voltaje
- Medidores de corriente
- Módulos de temperatura
- Módulos de resistencia
- Entradas / Salidas digitales
- Relé
- Contador/Generador de pulso
- Comunicaciones LIN y CAN

Debido al aplicativo a estudio la conformación del rack deberá incluir, necesariamente, los módulos de acelerómetros, sondas de desplazamiento y modulo de relés. Adicionalmente, si se requiere realizar conexiones con otros sistemas de control - orientados a proporcionar control físico sobre la máquina en cuestión - se puede pensar en incluir como parte de la solución módulos de comunicaciones LIN y CAN. Estos extienden las posibilidades de interconexión con otros sistemas dado que amplían el espectro de protocolos de comunicación con los que el equipo puede establecer conexión.

Así, el producto configurado de manera personalizada, podría tener este aspecto:



Figura 14.6 Solución NI personalizada en torno a cDAQ-9137

- NI cDAQ-9137
- NI 9232 (Acelerómetros) (3 IN)
- NI 9232 (Acelerómetros) (3 IN)
- NI 9232 (Acelerómetros) (2 IN)
- NI 9862 (LIN y CAN)
- NI 9485 (Relay module)

Tabla 14.7 Listado composición solución a partir de NI cDAQ-9137

Conviene destacar que esta solución requiere de cierta programación/personalización para alcanzar el comportamiento/prestaciones deseadas para la monitorización. Para ello, será necesario una familiarización con las herramientas que ofrece NI.

2.39.3. NI LabView

Si bien los componentes de la solución ofrecida por NI presentados hasta ahora estaban acotados al apartado de la adquisición y procesamiento de datos, la solución de NI va más allá. Similarmente a soluciones de otros fabricantes del sector, NI ofrece una solución *end-to-end* que incluirá no solamente el bloque de adquisición de datos sino que añadirá el software necesario para su configuración, digestión y análisis. Esta herramienta toma el nombre de *LabView*.

LabView es una plataforma que proporciona la base para la monitorización de diferentes tipologías de maquinaria -el carácter genérico de las soluciones NI dota de versatilidad la solución también en esta capa- con la capacidad de personalizar la solución a los requerimientos de cada aplicación industrial.

Como comentado anteriormente, este aplicativo podrá hacer las veces de herramienta de análisis y procesamiento de datos, así como de herramienta de configuración de equipos. La herramienta ofrece la posibilidad, también mediante programación gráfica, de modelar cualquier máquina haciendo uso de componentes disponibles en las librerías de objetos de la misma. Así, se podrán modelizar diferentes componentes de la instalación mediante la personalización de objetos precargados.

Como se observa en el detalle comercial que sigue, esta plataforma permitirá realizar configuraciones que simulen determinados comportamientos de máquina, visualizar el flujo de datos o analizar el código fuente de determinadas funciones.

Adicionalmente, la solución tiene un marcado carácter de plataforma, ofreciendo a terceros la posibilidad de desarrollar módulos para el análisis de determinados fenómenos de máquina para su posterior comercialización como extensión a la solución existente (módulo de análisis de vientos, por ejemplo).

Si bien se trata de una solución robusta y solvente que ofrece como principal ventaja su marcado carácter genérico, tiene como contrapartida la inexistencia de herramientas pre-instaladas. En cierta medida, se puede considerar que esta alternativa relega la responsabilidad de configurar el sistema (cualquier sistema) al usuario final. Desde la modelización de los equipos monitorizados, caracterización de los sensores, niveles de alarma hasta las herramientas de informes o de visualización y graficado de determinados indicadores de rendimiento.

A pesar de la limitación anteriormente mencionada, sería injusto menoscabar el potencial que esta solución ofrece para compañías que cuenten con diversas divisiones -diferentes módulos de negocio- y que contemplen depositar su confianza en una misma plataforma como referencia para la totalidad de la compañía. En cuyos casos, contar con equipos de profesionales con alto conocimiento de la herramienta *LabView* sea posible. En estas circunstancias, por ejemplo, estas compañías podrían plantearse contar con profesionales cuya única dedicación consistiría en configurar *LabView* para nuevos proyectos en diferentes divisiones sin tener un dominio específico del negocio.

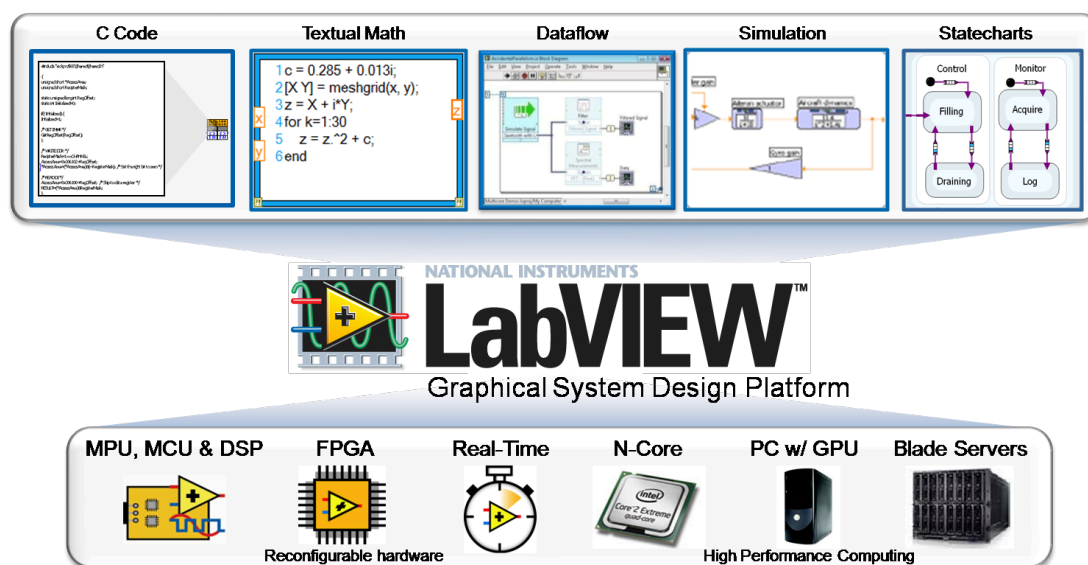


Figura 14.7 Esquema resumen capacidades solución National Instruments *LabView*

2.39.4. NI - ajuste a problema tipo

Como comentado con anterioridad esta se trata, probablemente, de la solución que requerirá de mayores esfuerzos por parte de los equipos encargados de realizar la operación y mantenimiento de la máquina. Esto es así debido a la necesidad de configurar las herramientas de adquisición desde la base, realizando las configuraciones desde *LabView* sin posibilidad de contar con configuraciones pre-cargadas.

En cierto sentido, la ventaja competitiva de NI -su característica flexibilidad para ofrecer soluciones para multitud de sectores industriales- se convierte en una potencial desventaja, dada la excesiva responsabilidad que traslada al usuario final / administradores del sistema para la conformación de la solución final. Desde la elección del producto de *Hardware* que

más se ajuste a las necesidades del proyecto mediante la elección módulo a módulo, hasta la configuración del propio software de adquisición y monitorización de las señales. En cierto sentido, la instancia del aplicativo viene *vacía*. Como resultado, se requerirá contar con conocimientos avanzados de la herramienta para garantizar una correcta configuración del sistema.

2.40. Bently Nevada

2.40.1. Breve historia la compañía

Actualmente perteneciente al gigante industrial *General Electric Energy* (GE) desde el 2002, Bently Nevada (en adelante, BN) es fundada en el año 1956 por Donald E. Bently en Berkeley, California, EE.UU. Los primeros productos que se comercializan, las *eddy-current proximity probes* utilizadas originalmente en entornos de pruebas o laboratorios, se convierten en referente para el análisis de condición de la maquinaria rotativa en las próximas décadas (valiéndose del auge del sector).

Como evolución natural de sus productos de monitorización, BN inició la fabricación de instrumentación para permitir la monitorización de los sensores, posibilitando el uso de sus sistemas como sistemas de protección de maquinaria (al hacer saltar alarmas ante exceso de vibración, se realizaba el paro de la máquina de forma autónoma).

La compañía continuará creciendo hasta su venta a la corporación GE, tanto en el apartado de la mejora de equipos de instrumentación, como de diagnóstico de maquinaria (gracias a los sistemas de análisis desarrollados durante décadas) convirtiéndose en un referente industrial en el ámbito de la instrumentación y diagnóstico de vibraciones.

2.40.2. BN Condition Monitoring: soluciones

2.40.2.1. BN 3500 Series

Similarmente a lo que ocurre con otras de las soluciones propuestas por fabricantes descritos en este estudio, la línea de productos *BN 3500 Series* se presenta como una solución flexible y robusta.

Este producto viene empaquetado en forma de rack, con la posibilidad de conformar las prestaciones finales mediante el añadido/ampliación de los módulos que lo componen. Se trata de una solución genérica que no se encuentra localizada para la industria eólica en particular, si bien ofrece las prestaciones necesarias para monitorizar maquinaria rotativa. Entre los ejemplos que el fabricante indica como potenciales ámbitos de uso se encuentra la monitorización de turbinas de gas, turbinas hidráulicas, motores y generadores eléctricos, bombas hidráulicas o cajas de cambio.

Si bien la disposición en forma de rack permite la conformación de los n-módulos requeridos, BN ofrece un chasis denominado mini-rack que, dadas las necesidades del caso a estudio, resultará una solución más adecuada a las necesidades. El producto mini-rack, como se muestra a continuación, cuenta con espacio suficiente para albergar hasta 7 módulos.

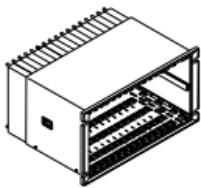


Figura 14.8 Chasis Rack 3500 Series

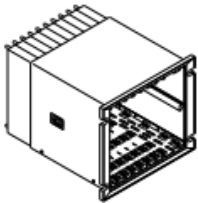


Figura 14.9 Chasis Mini-Rack 3500 Series

<i>Rack 3500 Series</i>	<i>Mini-Rack 3500 Series</i>
<ul style="list-style-type: none">▪ 2 Módulos de alimentación▪ Módulo/slot RIM (Rack Interface Module)▪ 14 espacios adicionales para usos alternativos	<ul style="list-style-type: none">▪ 2 Módulos de alimentación▪ Módulo/slot RIM (Rack Interface Module)▪ 7 espacios adicionales para usos alternativos

Tabla 14.8 Alternativas de chasis de la familia BN 3500 Series [10]

El resto de los módulos necesarios para garantizar alcanzar los requerimientos par la monitorización serían los siguientes:

2.40.2.1.1 BN 3500/42M

- *3500/42M Proximito*/Seismic Monitor* [11]
- Módulo acepta la entrada de hasta 4 canales (para lectura de acelerómetros piezoeléctricos).
- Configurable para comprobar contra los valores configurados por usuario como fuera de rango. En el evento de llegar a valor límite, se activa una alerta.
- Es posible configurar niveles de aviso (nivel de peligrosidad considerado inferior al de la alerta).



Figura 14.9 Módulo BN 3500/42M

2.40.2.1.2 BN 3500/33

- *3500/33 16-Channel Relay Module* [12]
- Permite la ejecución de instrucciones mediante el uso de los avisos y alarmas generados en el equipo.
- Cuenta con hasta 16 canales diferenciados para ejecutar las instrucciones.



Figura 14.10 Módulo BN 3500/33

2.40.2.1.3 BN 3500/92

- *3500/92 Communication Gateway* [13]
- Módulo de comunicaciones diseñado para comunicar con otros equipos de control o de automatización vía protocolos de comunicaciones estándares Ethernet TCP/IP y seriales (RS232/RS422/RS485).
- Protocolos de comunicación soportados por este módulo incluyen:
 - Modicon® Modbus®
 - Modbus/TCP (variante serial utilizada para la comunicación TCP/IP en comunicaciones vía Ethernet).
 - Protocolo Bently Nevada (para comunicaciones con *3500 Rack Configuration and Data Acquisition Software* – módulos de System1 para la configuración y adquisición de datos desde *DAQ BN 3500* en su totalidad.)

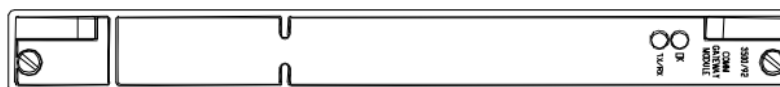


Figura 14.11 Módulo BN 3500/92

2.40.2.1.4 BN 3500/91 (Opcional)

- *3500/91 EGD Communication Gateway Module* [14]
- Módulo específicamente diseñado para conectar con aplicaciones controladoras, proporcionando respuestas en intervalos de tiempo reducidos.
- Soporta protocolos de comunicación EGD y Ethernet UDP/IP.

2.40.2.1.5 BN 3500/94 (Opcional)

- *3500/94 VGA Display* [15]
- Posibilidad de instalar un módulo que ofrezca al operador que se desplaza físicamente hasta el emplazamiento (máquina) acceso a:
 - Eventos generados en el sistema;
 - Listados de alarmas generadas;
 - Totalidad de módulos y canales de datos del equipo (permite visualizar hasta 4 racks);
 - Alarma actual (vista rápida);
 - Vistas del contenido personalizables;
- Si se requiere de la instalación de este módulo se requiere contar con un chasis (rack) de 19" completo para su instalación.

2.40.2.2. BN Wireless System

Conocido - y comercializado - bajo el nombre *Essential Insight.mesh* Wireless System* [16]. Este sistema permite realizar la adquisición de datos y posterior transmisión de forma inalámbrica. Esta alternativa puede resultar interesante en emplazamientos en los que la implementación de la solución convencional resulte complicada. Este hecho puede darse debido alguno -o combinación- de los factores que siguen:

- Imposibilidad de instalar un sistema convencional, debido a la dificultad de la instalación o el acceso a la misma;
- Imposibilidad de instalar un sistema convencional, debido a la dificultad alimentar los equipos estacionarios/fijos convencionales;
- Inexistencia de sistema de monitorización en emplazamiento;

2.40.2.2.1 Esquema básico y componentes de la solución

- *ISA100 Manager Gateway* - equipo encargado de recibir las n-señales de los m-DAQs (wSIMs instalados en el complejo)

- *Wireless Sensor Interface Module (wSIM*, en adelante) - equipo encargado de adquirir y transmitir la señal recibida desde los sensores/transductores.
- Repetidores - en configuraciones que requieran del uso de repetidores, se podrá realizar la instalación de los mismos para extender el alcance de la señal generada en el *wSIM*.

2.40.2.2.2 *Wireless Sensor Interface Module*

Como definido brevemente con anterioridad, se trata del componente de la solución que permite la adquisición de las señales transmitidas por el transductor. La breve descripción que sigue, lista algunas de las características que este equipo ofrece.



Figura 14.12 *wSIM* con (drcha.)
y sin alimentación (izqda.)

- Posibilidad de conectar acelerómetros
- Posibilidad de conectar sondas de desplazamiento
- Hasta 4 entradas
- Realiza escaneado (barrido) de lecturas en intervalos configurables (frecuencias minutas en adelante, pudiendo llegar a ser de hasta 24 horas, si la aplicación lo requiere).
- Alcance de 200m en línea recta y 3m en AGL.

2.40.2.2.3 *ISA100 Manager Gateway*

Este dispositivo será el encargado de consolidar las *n*-señales de los *m-wSIM* para su posterior envío al PC Industrial.

Como se puede identificar en los esquemas anteriores, este equipo cuenta con la suficiente flexibilidad como para la consolidación de hasta 50 *wSIM* diferentes. Si se considera que cada *w-SIM* puede estar adquiriendo datos de un número máximo de 4 sensores, la cifra de sensores por Gateway asciende hasta los 200. Así, si se toma el ejemplo del caso a estudio - en el que cada *wSIM* contará con 3 señales, una por cada sensor monitorizado - podríamos llegar a conectar, si fuese necesario, hasta 50 aerogeneradores por cada *ISA100 MG*.

Adicionalmente, se puede realizar la conexión de hasta 5 *ISA100 MG* por cada instancia de *System1* (el software de gestión y monitorización que se verá en los apartados que siguen). Esto eleva la capacidad global del sistema a unos 250 aerogeneradores por instancia de *System1*.



Figura 14.13 ISA 100 GM

- Posibilidad de instalar diferentes antenas dependiendo de las certificaciones y prestaciones requeridas
- Rango de trabajo entre -40 y + 60°C / 80°C (dependiendo de la antena escogida)
- Interficie de comunicación IEEE 802.15.4
- Cable Ethernet de hasta 100m de longitud

2.40.2.2.4 Posibles configuraciones de la solución

La solución que propone BN para su sistema de monitorización sin cableado, permite dos configuraciones de transmisión de datos.

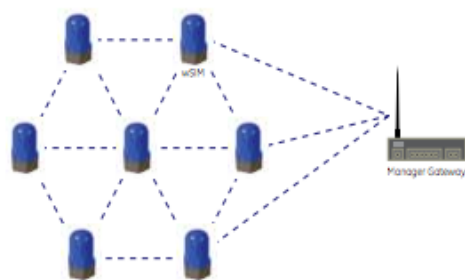


Figura 14.14 Disposición mallada

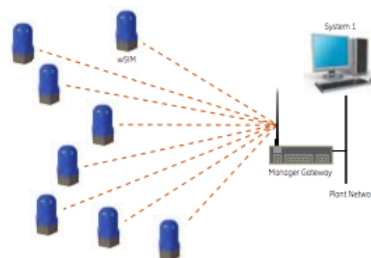


Figura 14.15 Disposición radial

Como se ilustra en las figuras anteriores, las diferencias fundamentales estriban en la existencia de repetidores de las señales adquiridas por las DAQUs- wSIM.

Si tan solo se cuenta con una red de unidades wSIM, la configuración será la de una red radial (cada unidad comunicará con el equipo ISA100 MG de forma individual e independiente). Si, adicionalmente a las unidades wSIM, se cuenta con unidades repetidoras, la configuración permitirá generar un red mallada - Meshed - que minimizará las posibilidades de fallos en la comunicación (pérdida de datos por interferencias, fallo en unidad emisora, etc).

2.40.2.2.5 Consideraciones adicionales soluciones inalámbricas

Si bien resulta enteramente atractivo dada la relativa simplicidad de la instalación de la infraestructura requerida, conviene recordar las limitaciones o restricciones que vienen de la mano de las soluciones sin cableado.

- Distancias. Como visto en el capítulo específico de comunicaciones, la distancia desde el punto de generación de la señal (*wSIM*) hasta el punto de consolidación en la capa de software (*ISA100 MG*) puede suponer una limitación difícil de franquear.
- Interferencias de señales. Nuevamente, como visto en el capítulo específico de comunicaciones, se puede llegar a dar la circunstancia de contar con datos inconsistentes o, en cierta manera, corruptos debido a una interferencia ocasionada a lo largo del proceso de comunicación inalámbrica. En este sentido, se podría incluso dar la situación de perder la totalidad de los paquetes enviados.
- Alimentación de componentes. Pese a que existe la posibilidad de adquirir *wSIMs* con configuración de alimentación externa (con conexión a la toma de corriente), si se opta por configuración a base de batería, convendrá garantizar el suministro adecuado de energía a los *n*-repetidores instalados. Este hecho puede condicionar significativamente la solución final adoptada.

2.40.3. System1: software de gestión y diagnóstico

System1 es el software de gestión y diagnóstico que BN ofrece para la monitorización de diferentes activos. Similarmente a lo que ocurre con otras soluciones analizadas en este estudio, se trata de una plataforma compartida con otras de gamas de productos (las 3500 Series o la solución inalámbrica *wSIM* son comercializadas para ser gestionadas desde System1, por ejemplo).

El método de comercialización de la herramienta permite decidir entre el número de usuarios (aplicaciones cliente) con permisos de acceso al aplicativo. El coste de la solución, por tanto, dependerá del número de licencias requeridas para realizar el mantenimiento.

Como disponible en otras de las soluciones de mercado, esta presenta una arquitectura de cliente-servidor que requerirá de la compra de licencias para su uso. La parte servidora permitirá el almacenaje, así como ostentar la responsabilidad de calcular y procesar los datos. Tradicionalmente, la parte cliente de estas aplicaciones tiene como fin permitir la visualización e interacción del usuario con los datos. Será conveniente por tanto tomar en consideración las prestaciones de la máquina cliente para garantizar una correcta experiencia de usuario.

El esquema que sigue pretende ilustrar, con algo más de claridad, la arquitectura de la solución.

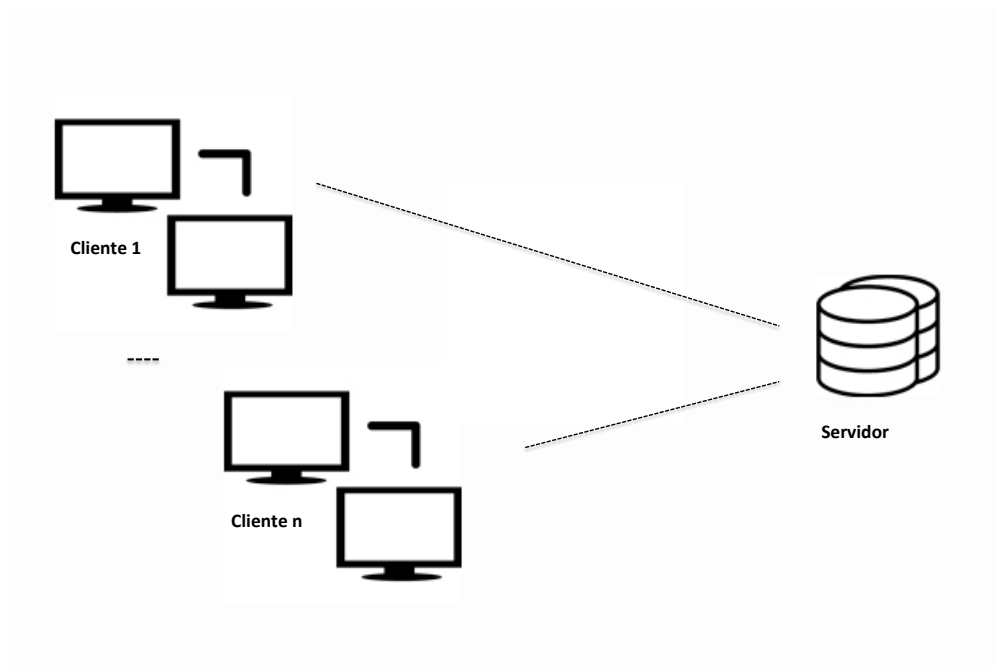


Figura 14.16 Arquitectura sistema cliente-servidor

Entre las ventajas que este aplicativo ofrece, las que se destacan a continuación prometen dar servicio a prácticamente cualquier requerimiento de prestaciones por parte del mercado. Será importante tomar en consideración la composición .

Herramientas de análisis y diagnóstico	Graficado de barras, polar, de tendencias o de bode.
Configuración herramienta orientada a usuario	Existencia de asistentes para minimizar el tiempo de configuración. Librerías pre-cargadas con plantillas de sensores y elementos.
Sistema configurable de avisos y alertas	Asistente para la configuración de avisos y alertas. Configuración personalizable para

	lanzar avisos en el momento deseado.
Herramientas de informes	Posibilidad de generar informes de los datos monitorizados vía exportaciones de datos a través de MS Excel.

Tabla 14.9 Detalle funcionalidades *BN System 1* [17]

La imagen que aparece a continuación, parte de trípticos informativos de la solución, ilustra la variada composición de los módulos de la plataforma *BN System 1*.

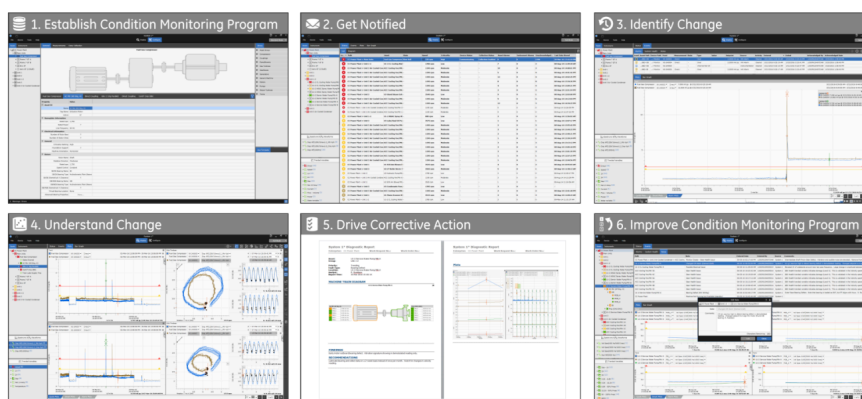


Figura 14.17 Imágenes de posibilidades que se ofertan en la suite *BN System 1*

2.40.4. Hardware BN - ajuste a problema tipo

2.40.4.1. Essential Insight.mesh* Wireless System

Se trata de la solución inalámbrica ofrecida por BN. Como comentado en el sub apartado específico se considera no idónea para la aplicación a estudio debido a las limitaciones técnicas que presenta.

Sus prestaciones están quizá más orientadas a emplazamientos en el interior de fábricas u otras localizaciones similares en las que las distancias desde el punto de medición de señales con las estaciones *Gateway* sean menores. En este tipo de instalaciones las soluciones con uso de cableado pueden resultar molestas de instalar (si se cuenta con demasiados elementos en la ruta del cable).

Adicionalmente, la necesidad de instalar repetidores para ampliar el radio de alcance de las señales emitidas, puede acarrear retos adicionales de suministro de alimentación.

2.40.4.2. 3500 Series

Similarmente a lo ocurrido con otras de las soluciones presentadas en este estudio, la ofrecida por la 3500 Series es una solución de garantías, pese a no estar implementada específicamente para aplicaciones eólicas. Su marcado carácter modular permitirá añadir un número de módulos considerable (difícilmente se alcanzaría el límite en soluciones de para la monitorización de aerogeneradores).

La conformación del sistema de adquisición de datos en el aerogenerador, por tanto, estará supeditada a las necesidades de cada proyecto.

2.40.5. Software BN - ajuste a problema tipo

Adicionalmente, el aplicativo/ecosistema *System 1*, compatible con la solución inalámbrica, se presenta como una solución robusta y solvente. La flexibilidad ofrecida, tanto a nivel de configuración de avisos y alarmas como a nivel de operación y mantenimiento, se encuentra, posiblemente, entre las más interesantes del mercado.

Pese a no contar con localización específica para la industria eólica, este aplicativo ofrece la garantía del grupo industrial cuya dilatada experiencia en multitud de sectores industriales (turbinas de vapor o refinerías) les ha permitido plasmar en las herramientas de análisis de vibraciones.

2.41. SHINKAWA Electric Co. Ltd.

2.41.1. Breve historia la compañía

SHINKAWA Electric Co. Ltd. Cuenta con una de las historias más dilatadas de la industria, origen de la cual data del 1927. Tras décadas de evolución del negocio en diferentes divisiones y sectores, inicia una expansión internacional para abrir delegaciones en mercados internacionales que la lleva a abrir sedes en Estados Unidos, China o Singapur, entre otros.

En la actualidad cuenta con un número total de empleados del orden de los 650 a nivel mundial. Su sede central se encuentra en Tokyo, Japón.

La filial SHINKAWA Sensor Technologies, Inc., cuya especialización resulta interesante para este estudio, desarrolla su negocio el área de diseño y manufactura de sensores de desplazamiento y vibración para diferentes aplicativos industriales. Fundada en 1994, con sede en el distrito Higashi-Hiroshima, cuenta con una plantilla del orden de los 135 empleados. A modo ilustrativo, esta compañía cuenta entre su cartera de clientes a, entre otros, la agencia aeroespacial nipona JAXA. También puede resultar interesante para el lector conocer, así mismo, que grandes conglomerados industriales de la talla de los Mitsubishi, Hitachi o Toshiba también se encuentran en su cartera.

2.41.2. CMS: soluciones de monitorización

Como se ha comentado con anterioridad, y, similarmente a lo que sucede con otras soluciones que se encuentran en el mercado, SHINKAWA propone una solución integral *end-to-end* que va desde el sensor de fabricación propia hasta el software de monitorización y mantenimiento.

En el apartado de sistemas de adquisición y procesamiento de datos locales, SHINKAWA propone una oferta relativamente flexible para un variado número de aplicativos industriales. Debido a las prestaciones requeridas, dentro de la oferta comercial de SHINKAWA, probablemente resulte idóneo pensar en los equipos de monitorización de la serie/familia VM-5.

Pese a ello, a modo ilustrativo no obstante, se presentan las diferentes familias de producto que se ofrecen en NI en el apartado de equipos de monitorización.

VM-21

Equipo de monitorización que presenta las prestaciones más limitadas de las familias descritas en tabla, en líneas

generales, pese a no presentar limitaciones de en cuanto a la capacidad de monitorizar transductores de la familia a estudio, no es capaz de ser conectado a los DAQ ofrecidos por el propio fabricante, con lo que queda descartada su implantación para este estudio.

VM-5

Se trata del equipo de monitorización que presenta unas condiciones suficientes para la monitorización de la aplicación a estudio. Tiene un marcado carácter modular, con capacidad de incorporar diferentes módulos que permitan la monitorización de variables tan variadas como:

- Vibración
- Temperaturas
- Velocidades de rotación del eje

Presenta un sistema de alimentación embebido en el chasis.

VM-7 / VM-7B

Se trata de los equipos con mayores prestaciones del fabricante. Cuenta con certificaciones API e ISO para la protección de maquinaria rotativa crítica (grandes turbinas para la generación de energía eléctrica, por ejemplo).

Pese a cumplir con los requerimientos del problema a estudio, se considera una solución sobredimensionada.

Tabla 14.10 Equipos de monitorización SHINKAWA [18]

El equipo VM-5 proporciona, probablemente, un nivel de prestaciones superior al requerido para el ejemplo a estudio. Dado que ofrece una versatilidad suficiente como para monitorizar señales en maquinaria rotativa de gran tamaño (turbinas de vapor, por ejemplo). Similarmente a las soluciones mencionadas anteriormente, se tratará de equipos enteramente modulares, que proporcionarán la flexibilidad de conformar el sistema de monitorización que más se ajuste a las necesidades de la actividad industrial.

El diagrama que sigue a continuación permite ilustrar con algo más de claridad las soluciones propuestas por este fabricante.

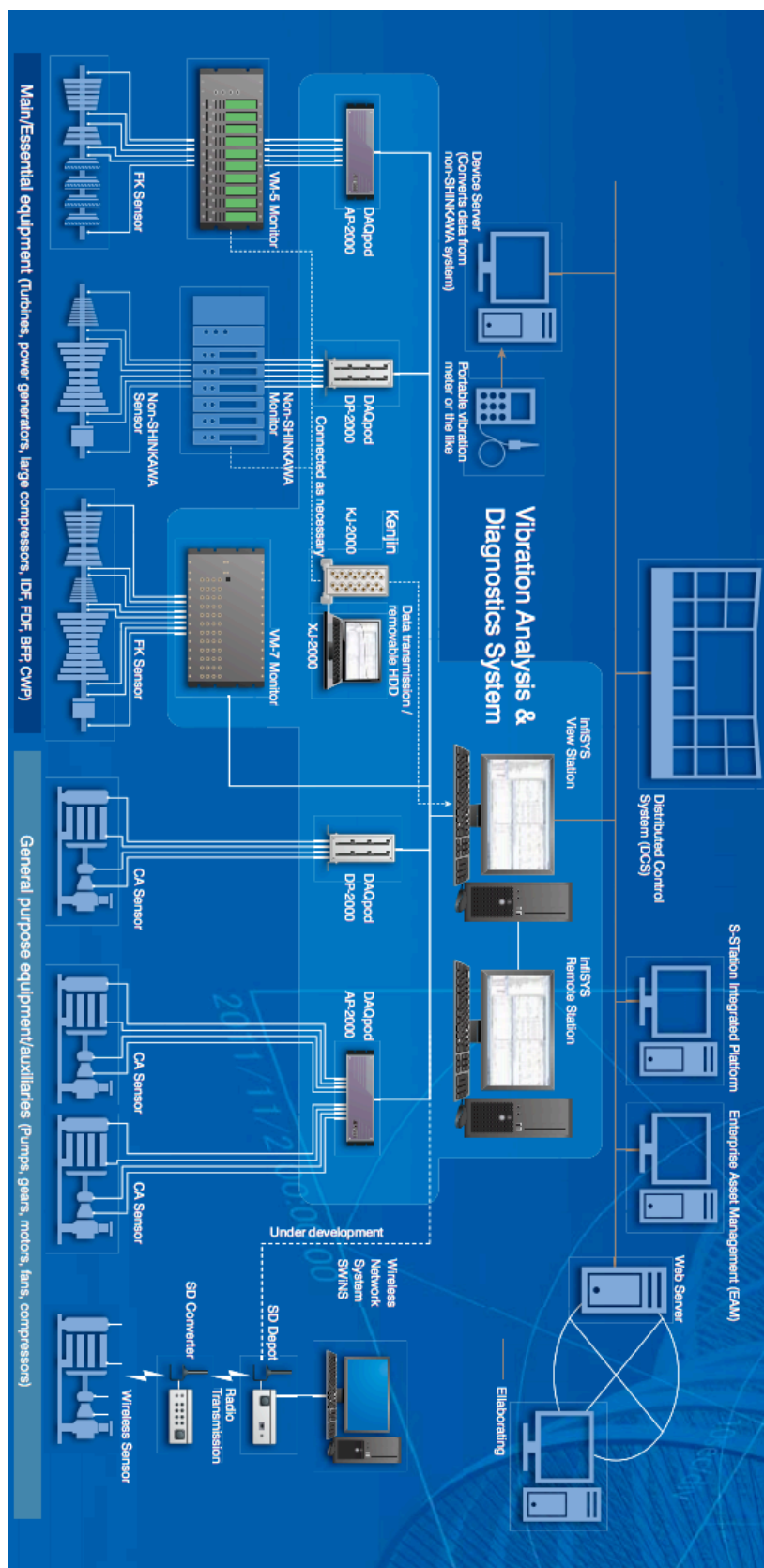


Figura 14.18 Esquema soluciones CMS SHINKAWA

Si bien se podría, como se presenta en el esquema anterior, optar por prescindir del monitor de la familia VM-5 y optar por conectar los sensores directamente a los DAQ (bien AP-2000 o DP-2000), lo cierto es que esta alternativa podría limitar la posibilidad de integrar otras señales que se podría estar monitorizando (temperaturas, sondas meteorológicas, etc). Se descarta esta alternativa, para poder equiparar los equipos de esta oferta a los anteriormente presentados.

Así, si se toma como solución la familia de productos VM-5 en combinación con el DAQ AP-2000 y se realiza una configuración que permita la monitorización de las variables deseadas, imitando disposiciones anteriores, el contenido del chasis podría quedar como se lista en la tabla a continuación.

VM-53 Dual Comm. Unit	Módulo de comunicación	Permite la conexión del equipo mediante protocolo MODBUS al PC industrial.
VM-5Z2 Power Supply Unit	Módulo de alimentación	Proporciona la alimentación en DC a la totalidad del rack.
VM-5Z0 Power Backup Module Unit	Unidad de alimentación de emergencia	Proporciona la alimentación en DC al rack ante un eventual corte de suministro eléctrico.
VM-5Y7 Relay Module Unit	Módulo de relé(s)	4 puntos de salida. Ofrece posibilidad de condicionar la salida en torno a alertas o <i>dangers</i> . Salida es una señal de contacto de secuencia de control.
VM-5B Dual Accel. Monitor (x4)	Módulo de acelerómetros	Ofrece la posibilidad de monitorizar 2 entradas.
VM-5F (opcional)	Módulo de temperatura.	Ofrece la posibilidad de tener dos señales de entrada. Medirá variables de temperatura de funcionamiento de la máquina

Tabla 14.11 Módulos familia VM-5 [19]

2.41.3. InfoSYS RV-200 System

Similarmente a lo ofrecido por otros fabricantes, el sistema infoSYS RV-200 se trata de la herramienta que proporciona la flexibilidad para realizar la configuración de equipos del conjunto, así como la posibilidad de realizar las tareas específicas del mantenimiento (graficado de variables, generación de informes, visualización de tendencias, etc).

A efectos de configuración del producto deseado, conviene mencionar las partes que oferta el fabricante como parte de esta *suite*. Dependiendo de los módulos que se deseen instalar, se hará necesario adquirir diferentes licencias del producto. Así mismo, es indispensable conocer los requerimientos de acceso - número de usuarios + terminales desde los cuales se precise acceder - dado que esto condicionará el coste final de la solución.

VM-773B Analysis View	Módulo de visión de variables monitorizadas. Incluye funciones de graficado, diagramas polares, graficado de ondas, etc. Adicionalmente ofrece análisis de pico, cresta, banda o factor de forma, entre otros. Debido a la arquitectura de esta solución, este aplicativo se deberá instalar en el PC industrial.
VM-774B Remote View	Módulo de software a instalar en máquina cliente que accederá remotamente a infoSYS.
VM-781B Diagnostic Software	Módulo específico que permite realizar el diagnóstico del estado de la máquina. Este módulo proporciona un listado de las (3) posibles causas que motivan la anomalía en de la vibración. Estas quedan listadas en orden de probabilidad.
VM-772B Device Config	Módulo específicamente diseñado para la configuración del sistema de variables monitorizadas.
VM-783B Report Software	Módulo dedicado a la generación de informes de funcionamiento de la máquina. Según las especificaciones de fabricante, se trata de una herramienta que proporciona archivos en formato MS Excel o similar para su digestión/almacenamiento externo.

VM-784B OPC Client Software

Módulo dedicado a establecer conexión con la capa OPC Server - si no se requiere realizar actuaciones sobre la máquina, este módulo de comunicaciones de salida no será necesario.

Tabla 14.12 Módulos infoSYS RV-200 [20]

Como se puede intuir en la tabla anterior, esta solución no contempla la posibilidad de acceder al aplicativo desde un entorno web. Se trata de una solución de escritorio que requiere la ejecución de una aplicación local en la máquina cliente. Cuenta así mismo con la limitación añadida de ser una aplicación implementada a partir de tecnología .NET, con la necesidad de ejecutar la aplicación desde computadoras con sistema operativo Windows.

Así, dependiendo de los requerimientos de usuarios/localizaciones desde las cuales se requiera acceder al aplicativo, se requerirá de la instalación de las n-instancias del módulo *VM-774B Remote View* (tantas como máquinas requieran acceder a la instancia *VM-773B Analysis View*).

2.41.4. SHINKAWA CMS - ajuste a problema tipo

SHINKAWA CMS, como ocurre en ejemplos anteriores, ofrece una solución no localizada a la industria eólica específicamente, si bien la flexibilidad y fiabilidad de los sistemas de adquisición en combinación con la capa de software la sitúan como alternativa a tener en cuenta.

Se trata de la única solución no-localizada no desarrollada en EE.UU. descrita en este documento. Quizá excesivamente orientada al mercado nipón. Pese a su vocación internacional, conviene ponderar la marcada orientación de sus productos a normativas niponas en primera instancia para posterior adaptación (en algunos casos) a las normativas de otras latitudes. Factor a tener en cuenta si se pretende apostar por este proveedor para el desarrollo de negocio de un portfolio global.

Similarmenete a lo ofrecido en otras soluciones analizadas en este estudio, se trata de sistemas de adquisición modulares, quizá algo sobredimensionados para el problema tipo, que permiten incluir todas las prestaciones necesarias para el correcto mantenimiento de aerogeneradores.

El sistema InfoSYS RV-200, cuya arquitectura vuelve a ser la clásica cliente-servidor, permite en base a los requerimientos - tanto a nivel de número de usuarios como a nivel de

terminales desde las que se deberá acceder al mismo - escalar la solución. Esto es posible gracias a la compra de licencias e instalación del aplicativo en terminales a gusto de cliente final. Dadas sus prestaciones, este aplicativo, permitiría la posibilidad de ser operado desde un centro de control para la gestión de una flota/portfolio de proyectos.

Análisis comparativo

En este capítulo, a modo resumen, se pretende ofrecer una visión general de las características principales que ofrecen las soluciones presentadas anteriormente.

Igualmente, con el fin de ayudar al lector en la comprensión del problema a estudio, el gráfico que sigue ilustra las condiciones y dimensiones para la instalación con las que, previsiblemente, se contarían para realizar la instalación de los equipos.

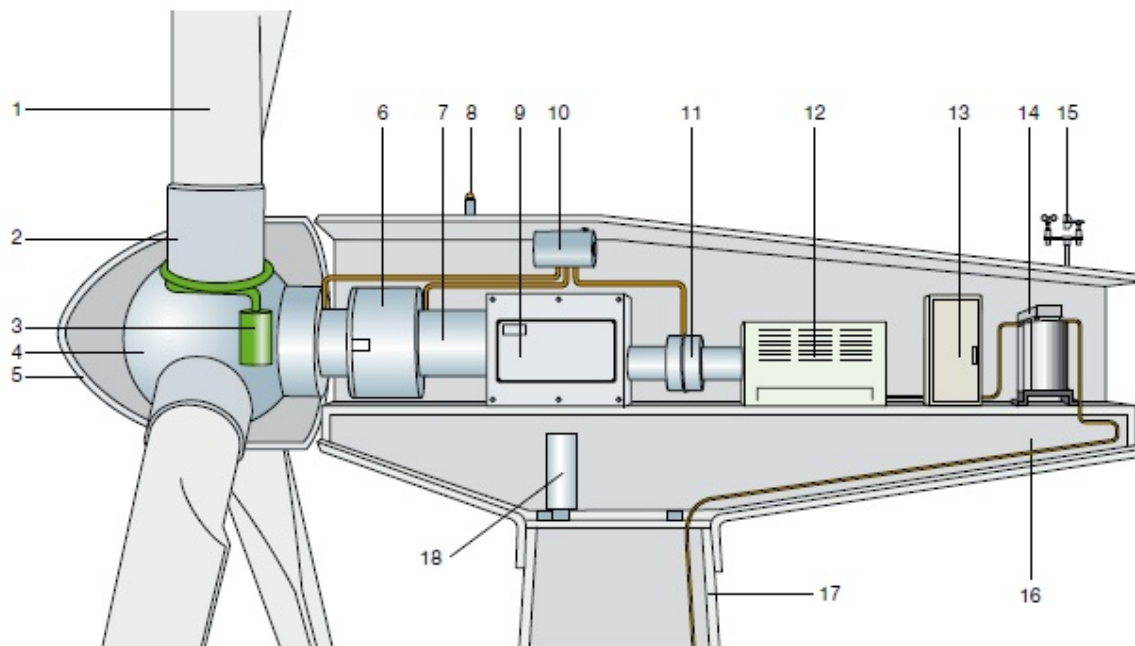


Figura 15.1 en la que se puede apreciar la localización de los equipos de adquisición en el interior de la góndola (punto 13) [21]

- **Consideraciones adicionales**

Se considera la distancia desde el transductor (sensor) instalado sobre la máquina hasta el punto de conexión con módulos DAQ de 10m, como máximo.

Adicionalmente, la longitud de cable de fibra necesaria para la comunicación de la base de la torre con el mundo exterior sería de, como máximo, 15m (para el tramo en el interior de la góndola). A esta distancia se deberá sumar, además, la distancia desde la góndola hasta la base del aerogenerador.

	SKF	National Instruments	Bentley Nevada 3500	Bentley Nevada wSIM	SHINKAWA CMS
Solución localizada Industria edifica	Si.	No.	No.	No.	No.
Montaje recomendado	Si. En armario.	No especificado	No especificado	Si. Puede estar localizado físicamente en el mismo chasis de la máquina.	No especificado
Posibilidad de integrar sistema con diferentes sensores	Si.	Si.	Si.	No. No permite integración con sensores diferentes a los proporcionados por BN.	Si.
Posibilidad de incorporar 8 sensores (acelerómetros)	Si. Equipo cuenta con 16 entradas analógicas.	Si. Solución modular con suficiente flexibilidad.	Si. Solución modular con suficiente flexibilidad.	Si. Solución permite un equipo con hasta 4 entradas.	Si. Solución modular con suficiente flexibilidad.
Posibilidad de incorporar lecturas de otros sensores (temperatura, desplazamiento)	Si. Equipo cuenta con 16 entradas analógicas.	Si. Solución modular con suficiente flexibilidad.	Si. Solución modular con suficiente flexibilidad.	Si. A partir de un número agregado de 4 entradas, se requiere la instalación de otro DAQ.	Si. Solución modular con suficiente flexibilidad.
Posibilidad de incorporar lecturas de otros sensores (anemómetros)	Si. Equipo cuenta con 2 entradas analógicas.	No.	No.	No.	No.
Posibilidad de integración con módulo de relés	Si. Equipo cuenta con función integrada.	Si. Solución modular con suficiente flexibilidad.	Si. Solución modular con suficiente flexibilidad.	No. No forma parte de solución.	Si. Solución modular con suficiente flexibilidad.
Medio de comunicación con exterior	Cableado de fibra. Protocolos TCP/IP vía Ethernet.	Cableado de fibra. Protocolos TCP/IP vía Ethernet.	Cableado de fibra. Protocolos TCP/IP vía Ethernet.	Conexión inalámbrica con alcance máximo de 200m. Posibilidad de incluir repetidores hasta sistema de gateway central.	Cableado de fibra. Protocolos TCP/IP vía Ethernet.
Integración con sistemas SCADA	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.
Operativa en local. Funciones HMI	Elementales. Indicadores de OK/KO por canal y funciones de configuración no avanzadas. Permite conexión con computadora portátil para configuración y diagnóstico en local.	Elementales. Indicadores de OK/KO por canal y funciones de configuración no avanzadas. Permite conexión con computadora portátil para configuración y diagnóstico en local.	Opcionalmente, se puede adquirir e integrar módulo con monitor VGA para las operaciones en local. Alternativamente, se cuenta con funciones elementales de OK/KO y posibilidad de conectar computadora portátil.	No.	Elementales. Indicadores de OK/KO por canal y funciones de configuración no avanzadas. Permite conexión con computadora portátil para configuración y diagnóstico en local.

Tabla 15.1 Comparativa prestaciones soluciones. Equipos físicos.

SKF	National Instruments			Bently Nevada System 1		SHINKAWA CMS	
		Si.	No.	No.	No.	No.	No.
Solución localizada industria eólica		Si.	No.	No.	No.	No.	No.
Solución requiere configuración por parte del usuario	Si. Configuración de los sensores que están conectados, particularidades de como debe comportarse los sistemas de alarma, etc.	Si. Configuración de los sensores que están conectados, particularidades de como debe comportarse los sistemas de alarma, etc.	Si. Requiere una configuración completa.	Si. Requiere una configuración considerable, dado que el producto no está adaptado a la industria.	Si. Requiere una configuración considerable, dado que el producto no está adaptado a la industria.	Si. Requiere una configuración considerable, dado que el producto no está adaptado a la industria.	Si. Requiere una configuración considerable, dado que el producto no está adaptado a la industria.
Arquitectura	Solución de escritorio basada en arquitectura cliente-servidor convencional.	Solución de escritorio basada en arquitectura cliente-servidor convencional.	Solución web. Permite acceso desde cualquier terminal.	Solución de escritorio basada en arquitectura cliente-servidor convencional.	Solución de escritorio basada en arquitectura cliente-servidor convencional.	Solución de escritorio basada en arquitectura cliente-servidor convencional.	Solución de escritorio basada en arquitectura cliente-servidor convencional.
Permite integración con otros sistemas de datos	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.
Ofrece funciones de diagnóstico y análisis	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.
Ofrece módulos de informes para la extracción de datos	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.
Configurabilidad de alarmas	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.
Permite pre-cargar objetos/plantillas	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.
Sistema de licencias de usuarios	Por usuario y número de máquinas cliente que requieran tener acceso a la suite	Por usuario y número de máquinas cliente que requieran tener acceso a la suite	Por usuario.	Por usuario y número de máquinas cliente que requieran tener acceso a la suite.	Por usuario y número de máquinas cliente que requieran tener acceso a la suite.	Por usuario y número de máquinas cliente que requieran tener acceso a la suite.	Por usuario y número de máquinas cliente que requieran tener acceso a la suite.

Tabla 15.2 Comparativa prestaciones software de gestión, configuración y mantenimiento

Justificación económica

Quizá de cara a justificar la instalación de estos sistemas de monitorización en aerogeneradores, resulta interesante poner en conocimiento estadísticas de averías críticas que se dan en componentes de aerogeneradores a lo largo de la vida útil de estos.

El gráfico que se muestra a continuación, proporcionado por el *National Renewable Energy Laboratory* (NREL perteneciente al *Department of Energy* de los EE.UU.) [22], ilustra el porcentaje de aerogeneradores que sufren fallos durante los 10 primeros años de operación y que requerirán sustitución de caja de cambios (azul oscuro) o del propio generador.

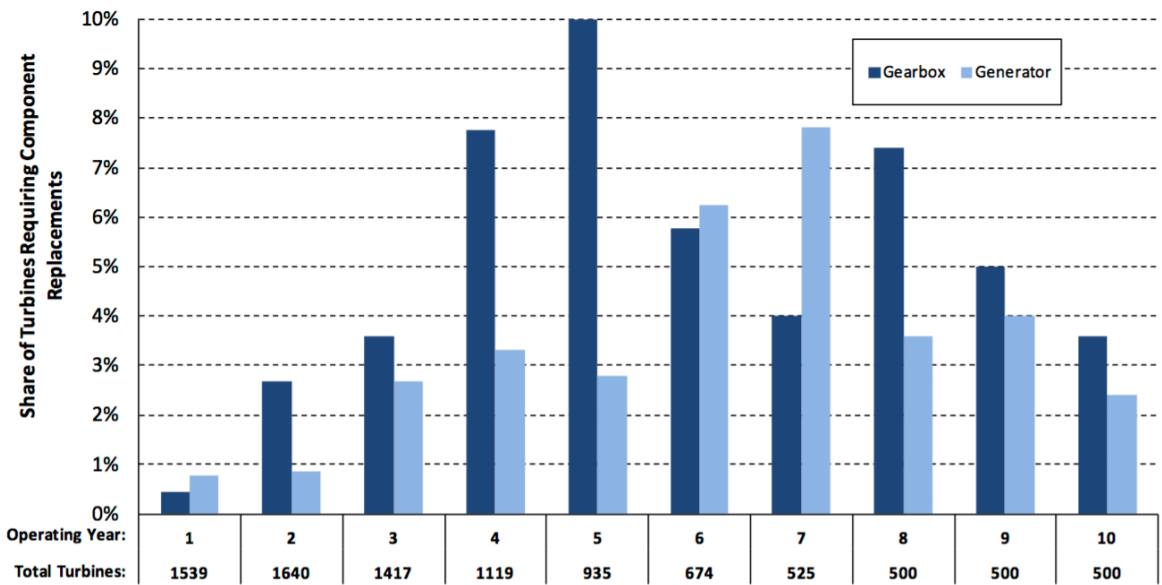


Figura 16.1 Gráfico con detalle de porcentaje de aerogeneradores que requieren sustitución de caja de cambios (azul oscuro) y generador (azul claro). [22]

Si se combinan los datos proporcionados por el estudio del NREL [22] - como compendio de datos generados a lo largo de años de operación de aerogeneradores en diferentes países europeos y en EE.UU. - con los datos proporcionados por el estudio *Gearbox Failure Investigation* [23], en el que se detallan los costes de un caso de sustitución de caja de cambios, cuyo extracto se encuentra a continuación, se puede apreciar la magnitud del impacto de una reparación de este tipo.

Nueva caja de cambios	\$203k
Reemplazamiento caja de cambios e instalación	\$407k

Alquiler grúa por intervalo de 7 días	\$32,2k
Total (*)	\$695,2k

Tabla 16.1 Estimaciones costes asociados en recambio de caja de cambios [23]

(*) Se considera en la partida total, otros gastos asociados a la operación particular de esta instalación. Estos incluyen, además de los listados en la Tabla 16.1, partidas de transporte de nuevo equipo o acondicionamiento del sistema de monitorización tras el cambio, entre otros.

Si bien el ejemplo anterior es un caso real con el que se podría tomar cierta distancia, dadas las particularidades de los equipos instalados, emplazamiento del aerogenerador, y otros conceptos que variarían en función de cada proyecto, estos no presentan grandes diferencias con los proporcionados por la empresa GL Garrad Hassan a modo de estimación.

Reemplazamiento caja de cambios	\$250k - \$350k
Reacondicionamiento caja de cambios	\$150k - \$200k
Reemplazamiento etapa caja de cambios	\$50k - \$90k
Reemplazamiento generador	\$90k - \$120k
Reacondicionamiento generador	\$70k - 90k

Tabla 16.2 Estimaciones costes asociados a averías severas proporcionados por Garrad Hassan en estudio de ventajas de sistemas de monitorización en aerogeneradores [24].

Si bien las soluciones presentadas en apartados anteriores no incorporaban el detalle del impacto económico de su implementación, si desea realizar el ejercicio de analizar el potencial ahorro que la adopción de soluciones de monitorización en continuo (*on-line*) puede suponer a lo largo la vida útil del aerogenerador, se podría tomar como ejemplo la siguiente ecuación:

$$LCC = C_{INV} + C_{CM} + C_{PM} + C_{PL} + C_{Rem} \quad (\text{Ec. 16.1}) [25]$$

Siendo:

- LCC los costes computables a lo largo de la vida útil (*Life Cycle Costs*)
- C_{INV} los costes asociados a la inversión en equipos
- C_{CM} los costes asociados a mantenimiento correctivo
- C_{PM} los costes asociados a mantenimiento preventivo
- C_{PL} los costes asociados a pérdidas de producción
- C_{Rem} los costes asociados al valor remanente

Los sistemas de monitorización permitirían reducir las partidas correspondientes a C_{CM} , C_{PM} y C_{PL} tanto en cuanto ofrecerían prestaciones para prevenir fallos, con la consecuente capacidad de proyectar indisponibilidades. Permitiendo planificar con antelación estrategias para minimizar u optimizar el impacto de las actuaciones (reparaciones) a llevar a cabo. Si bien la instalación de sistemas de monitorización podrán ser contabilizados en la partida C_{INV} (contribuyendo, desde el punto de vista de costes, al incremento del valor LCC). Convendría poner en valor el orden de magnitud de este coste, del orden de los \$20k (por aerogenerador) [24].

Se puede concluir que la destinación de recursos para la implementación de sistemas de monitorización puede suponer un considerable ahorro. La magnitud del cual vendrá enteramente condicionada por la estimación de averías por condiciones de trabajo.

Quizá un método para llegar a poder cuantificar el potencial ahorro que la inversión en un sistema de monitorización puede proporcionar, consistiría en describir la frecuencia de averías de máquina:

$$\mu = \frac{1}{MTBF} \quad (\text{Ec. 16.2}) [25]$$

Siendo:

- μ el ratio de fallo. Magnitud que indicará, al ser multiplicada por el tiempo de funcionamiento, el valor estimado de fallos que se darán;
- $MTBF$ tiempo medio entre fallos, por sus siglas en inglés (*Mean Time Between Failures*).

Pudiendo así mismo descomponer el tiempo medio entre fallos como el siguiente sumatorio:

$$MTBF = MDT + MTTF \quad (\text{Ec. 16.3}) [25]$$

Siendo:

- MDT el tiempo medio de parada, por sus siglas en inglés (*Mean Down Time*).

- *MTTF* el tiempo que transcurre hasta el fallo, por sus siglas en inglés (*Mean Time To Failure*).

La monitorización podrá contribuir a mejorar la vida útil tanto en cuanto anticiparía situaciones de fallo con la suficiente antelación para poder dimensionar, planificar y ejecutar la reparación a conciencia. En contraposición con una actuación correctiva, en cuyo caso, a menudo, se realizaría sin la totalidad de las garantías, debido a la necesidad de volver a operar/producir a la mayor celeridad posible.

Reemplazamiento correctivo	\$415k
Reemplazamiento preventivo	\$405k
Limitación reemplazamiento única etapa	\$280k

Tabla 16.3 Detalle de estimación de costes asociados a las reparaciones sobre la caja de cambios [24]

Con todo, se podría considerar que la adopción de un sistema adecuado de monitorización - que permita realizar un mantenimiento óptimo - que permita establecer los juicios adecuados de valor por parte de los equipos mantenedores: justificaría la inversión inicial y los costes fijos asociados a los n-años de operación del parque [24].

Impacto ambiental

Este estudio se ha elaborado en el domicilio particular mediante el uso de un computador de uso privado. A través de éste se ha procedido al compendio de información, generación de tablas y esquemas originales, así como a la redacción del propio documento.

Se puede considerar que el impacto ambiental de estas actividades comprenden el consumo energético de aparatos de acondicionamiento de aire, iluminación, calefacción así como consumibles de papel, tinta de impresión y bolígrafos.

La conexión a internet, así como el uso de llamadas telefónicas esporádicas para solicitud de información complementaria también pueden ser contabilizados como impacto ambiental.

Computador	150 horas de uso	15 kWh [26]
Iluminación	120 horas de uso	1,32 kWh
Acondicionamiento de aire	40 horas de uso	244 kWh [27]
Calefacción	40 horas de uso	272 kWh [27]

Tabla 16.1 Detalle de consumos energéticos por partida

Así, si se considera que el 28,8% [1] del consumo energético eléctrico proviene de fuentes de energía convencionales (la combustión de cuyos combustibles genera contaminación atmosférica), se puede estimar contando con las siguientes variables:

- Equivalencia kWh_t a $kg\ CO_2 = 0,9\ kgCO_2/kWh_t$
- Equivalencia $kWh_e / kWh_t = 0,35$
- % kWh_e procedente de generación térmica a fuel-oil = 28,8% [1]

Con las consideraciones anteriores, por tanto, se puede deducir el siguiente cálculo:

$$532,32\ kWh_e * \frac{1}{0,35} * 0,9 * 0,288 = 394,22\ kgCO_2 \quad (Ec. 16.1)$$

Adicionalmente, si se tomase este estudio como referencia para la toma de decisión para la instalación de sistemas de monitorización en aerogeneradores similares al que se toma como ejemplo, se podría considerar el impacto ambiental que la reducción de indisponibilidades tendría.

Conclusiones

Para la realización de este proyecto, ha sido necesario realizar una importante labor de lectura, documentación y familiarización con el estado del arte de las particularidades de esta industria, así como de la industria eólica en general. Pese a contar con experiencia previa en el ámbito de la monitorización de instalaciones fotovoltaicas, lo cierto es que la -en ocasiones- abrumadora oferta de soluciones han supuesto un reto de síntesis.

Pese a la relativa importancia del sector español en esta industria, ha sido habitual tener que realizar la traducción de multitud de textos, referencias o estudios para su posterior síntesis y plasmado en este documento.

Posiblemente algún lector podría encontrar propuestas no representadas como alternativas interesantes, fiables o incluso de referencia, como resultado de esta síntesis. Esto es así debido -principalmente- al recelo, silencio o simple falta de atención encontradas a lo largo de la ejecución del proyecto (en múltiples etapas del mismo).

En este sentido, la decisión de optar por las alternativas detalladas en los apartados anteriores responde precisamente al equilibrio encontrado entre facilidades de obtener prestaciones técnicas del propio fabricante, acceso a estudios publicados en los que se ejemplificaban casos de éxito con implementaciones similares a la propuesta como problema tipo o a la guía del director de este proyecto.

Pese a no haber sido posible en esta ocasión, contar el detalle económico de la implementación de sus soluciones, superando el recelos de los fabricantes, resultaría del todo interesante para futuros análisis.

A modo resumen, no obstante, se puede concluir que la instalación de sistemas para la monitorización de activos eólicos supone una inversión segura. Pese a que las particularidades de cada proyecto determinarán la magnitud del ahorro gracias a esta hipotética inversión, las fuentes consultadas estiman -en mayor o menor medida- los costes de reparación por averías de tipología severa en una horquilla de entre \$200k-\$400k [23] [24].

Si bien los sistemas de monitorización no eliminan la aparición de estas averías, contribuyen a la minimización de las partidas ligadas a actuaciones reactivas - clásicas en estrategias de mantenimiento menos sofisticadas.

Si, adicionalmente, se toma en consideración el tiempo necesario para poder trasladar hasta el emplazamiento los equipos - humanos y técnicos - para la realización de la tarea, incluyendo, pero no estando restringidos a:

1. Grúas para la sustitución de componente en el interior de la góndola;
2. Nuevo(s) componente(s) - expuestos a disponibilidad y plazos de entrega de proveedor en el supuesto caso de no contar con unidades de repuesto en stock;
3. Personal cualificado para la(s) tarea(s).

La posibilidad de anticipar con la suficiente previsión la eventual avería podría contribuir a reducir los costes asociados a la ineficiencia en la resolución de la misma [25]. Entendiendo estos como:

- Costes asociados a la disponibilidad extraordinaria de personal cualificado;
- Pérdida de producción asociada a esperas adicionales para solucionar avería;
- Sobrecostes asociados a la necesidad de adquirir componentes/materiales a la mayor brevedad posible.

Nuevamente, la magnitud de la efectividad del sistema de monitorización deberá ser analizada de manera individual (caso por caso), si bien los datos consultados para la realización de este estudio hacen pensar que se trata de una inversión rara vez no rentable.

Adicionalmente, se hace igualmente necesario dotar la vigilancia de estos activos con personal apto y cualificado que pueda realizar una gestión adecuada. En este sentido, la inteligencia y el aprendizaje en la operación, suponen factores imprescindibles para una gestión eficiente de los activos.

Precisamente debido a este motivo, es habitual que la elección del sistema estuviese condicionada por las particularidades del proyecto y de la empresa encargada de realizar la operación y mantenimiento. La - relativamente larga - curva de aprendizaje que las herramientas presentan, en combinación con las particularidades de interconexión con otros parques puede suponer un factor determinante.

Agradecimientos

Agradezco a la empresa *GREEN POWER MONITOR, S.L.* por haberme proporcionado la base de conocimientos en el campo de la monitorización y mantenimiento de instalaciones renovables en general, y eólicas en particular. En particular, a mi antiguo responsable, Humberto Roca, por ofrecer soporte, guía y conocimientos a lo largo de la realización del proyecto. Agradezco, así mismo, la dedicación y diligencia de Esteve Jou a la hora de guiarme y asesorarme a lo largo de todo este proyecto.

Por último, agradezco a mi familia y mi pareja por todo por su apoyo incondicional a lo largo de la duración de este proyecto.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] REE RED ELECCTRICA DE ESPAÑA, *Estadística diaria del sistema español peninsular*, Miércoles 31 de Agosto de 2016

[<http://www.ree.es/es/balance-diario/peninsula/2016/08/31>]
- [2] AEE ASOCIACION EMPRESARIAL EOLICA, *Potencia Instalada*, 2015

[<http://www.aeeolica.org/es/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/potencia-instalada/>]
- [3] M.J. NEALE, B.J. WOODY, *Condition Monitoring Methods and Economics*, Imperial College of London, 1975

[<http://www.bksv.es/doc/16-054.pdf>]
- [4] CTC, *CTC Accelerometers for wind turbines*

[<http://www.ctconline.com/pdf/pubTechPapers/17-Accelerometers%20for%20Wind%20Turbines.pdf>]
- [5] GAMESA, *Boosting Production in Medium Wind Sites GAMESA G114 - 2.5MW*

[<http://www.gamesacorp.com/recursos/doc/productos-servicios/aerogeneradores/nuevas-fichas/g114-25-mw-eng.pdf>]
- [6] SKF, *SKF IMx-W*, Catálogo de producto y prestaciones, Marzo 2016

[<http://www.skf.com/binary/12-21458/CM-P8-10674-2-EN-SKF-Multilog-IMx-W-data-sheet.pdf>]
- [7] SKF, *SKF @ptitude Observer*, Catálogo de producto y especificaciones, Junio 2016

[<http://www.skf.com/group/products/condition-monitoring/software/skf-aptitude-monitoring-suite/skf-aptitude-observer/index.html>]
- [8] NATIONAL INSTRUMENTS, *NI 9232*, Catálogo de producto y especificaciones técnicas, Abril 2016

[<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/210281>]
- [9] NATIONAL INSTRUMENTS, *NI cDAQ-9137*, Catálogo de producto y especificaciones técnicas, Abril 2016

[<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/213240>]
- [10] BENTLY NEVADA, *Bently Nevada 3500 Series Machinery Monitoring System*, Abril 2016

[<https://www.gemeasurement.com/condition-monitoring-and-protection/rack-based-monitoring/bently-nevada-3500-series-machinery-monitoring-system>]
- [11] BENTLY NEVADA, *Bently Nevada 3500/42M*, Abril 2016

[https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/3500_42m_proximitor_seismic_monitor_datasheet_143694n_0.pdf]

- [12] BENTLY NEVADA, *Bently Nevada 3500/33*, Abril 2016
[https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/3500_33_16-channel_relay_162301m_0.pdf]
- [13] BENTLY NEVADA, *Bently Nevada 3500/92*, Abril 2016
[https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/3500_92_communication_gateway_datasheet_141542_cda_000_0.pdf]
- [14] BENTLY NEVADA, *Bently Nevada 3500/91*, Abril 2016
[https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/3500_91_egd_communication_gateway_module_datasheet_0.pdf]
- [15] BENTLY NEVADA, *Bently Nevada 3500/94*, Abril 2016
[https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/350094_vga_display_datasheet_148635p.pdf]
- [16] BENTLY NEVADA, *Essential.mesh Wireless Condition Monitoring*, Junio 2016
[<https://www.gemeasurement.com/condition-monitoring-and-protection/wireless/bently-nevada-essential-insightmesh-wireless-condition>]
- [17] BENTLY NEVADA, *GE's System 1 Condition Monitoring and Diagnostic Software v16.1*, Julio 2016
[<https://www.gemeasurement.com/condition-monitoring-and-protection/software/ges-system-1-condition-monitoring-and-diagnostic>]
- [18] SHINKAWA ELECTRIC, *Condition Monitors*, Mayo 2016
[<https://www.shinkawaelectric.com/en/products/monitor/index.html>]
- [19] SHINKAWA ELECTRIC, *VM-5 Series Monitor*, Mayo 2016
[<https://www.shinkawaelectric.com/en/products/monitor/vm5.html>]
- [20] SHINKAWA ELECTRIC, *Analysis & Diagnostic System InfoSYS RV-200*, Abril 2016
[https://www.shinkawaelectric.com/en/products/analysis_diagnostics/infosys.html]
- [21] GAMMAENERGY.IT / *Principali Componenti*
[<http://www.gammaenergy.it/eolico/i-principali-componenti.html>]
- [22] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, *Report on Wind Turbine Subsystem Reliability – A Survey of Various Databases*, NREL/PR-5000-59111 June 2013, p. 10.
[<http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/59111.pdf>]
- [23] GEARBOX FAILURE INVESTIGATION, *Portsmouth, Rhode Island AAER 1500/77 Wind Turbine*, Don Roberts, DAR-EN-20120926, p. 19.
[https://docs.wind-watch.org/Portsmouth_RI_Turbine_Gearbox.pdf]
- [24] MARC LEBLANC, ANNEMARIE GRAVES *Condition Monitoring Systems: Trends and Cost Benefits* p.17, 18

[25] BERTRAND KERRES, KATHARINA FISCHER, AND REINHARD MADLENER *Economic evaluation of maintenance strategies for wind turbines: a stochastic analysis*. FCN Working Paper No. 3/2014. March 2014.

[26] CONSUMO ENERGÉTICO Y POTENCIA TÉRMICA DE LOS ORDENADORES iMAC

[<https://support.apple.com/es-es/HT201918>]

[27] CONSUMO ENERGÉTICO HOME AIRE ACONDICIONADO

[<http://www.mitsubishielectric.es/aire-acondicionado/producto/gama-domestica/unidades-pared/serie-msz-hj#>]

Bibliografía complementaria

MAY, ALLAN; MCMILLAN, DAVID; THÖNS, SEBASTIAN *Economic analysis of condition monitoring systems for offshore wind turbine sub-systems*. EWEA 2014

DANISH WIND ASSOCIATION INDUSTRY [<http://www.windpower.org/en>, 22 de Julio de 2016]

Anexo I Fichas Técnicas SKF

SKF Multilog On-line System IMx-W

24/7 condition monitoring to improve wind turbine reliability

The SKF Multilog On-line System IMx-W is the next generation of powerful, cost-effective solutions dedicated to wind turbine condition monitoring. Together with SKF @ptitude Observer software, the SKF Multilog IMx-W provides a complete system for early fault detection and prevention, automatic advice for correcting existing or impending conditions and advanced condition-based maintenance to improve reliability, availability and performance.

Key features

- Lightning protection
- Wall-mounted
- 16 dynamic or DC inputs and two digital inputs
- Simultaneous measurement of all channels
- Multi-parameter gating
- Digital Peak Enveloping (DPE)
- Adaptive alarm levels
- Data buffering in non-volatile memory when communication is down
- Output relay driver
- Fully supported by SKF @ptitude Observer software

General description

SKF Multilog IMx-W is an advanced condition monitoring system dedicated for use in wind turbines. It is a robust measurement unit designed for installation in wind farms on- and off-shore.

Each SKF Multilog IMx-W is equipped with 16 analogue signal inputs. The dynamic signal inputs are configurable for a variety of sensors. Signals, such as acceleration, velocity and displacement or other parameters are easily adopted. Each input can be configured for standard accelerometers,



SKF Multilog On-line System IMx-W equipped with 16 dynamic or DC inputs and 2 digital inputs.

proximity probes, 4 to 20 mA or ± 25 V. In addition to the analogue channels, two digital channels can be used for measuring speed, trigger or digital status e.g. indicating when a measurement can take place. Several measurement points can be attached to one channel and both AC and DC measurements can be measured on the same channel.

Individual conditions for warning and alarm can be set for each point. Warning and alarm levels may be controlled by machine speed or load.



General description *(continued)*

The SKF Multilog IMx-W works as a machine condition monitoring system with other SKF Multilog IMx units together in a network with the SKF @ptitude Observer Monitor. The system can run in an existing LAN combined with other equipment, communicate over UMTS (3G), GPRS, GSM, etc. or over the Internet.

The unit's unique built-in hardware auto-diagnosis system continuously checks all sensors, cabling and electronics for any faults, signal interruption, shortcuts or power failure and any malfunction triggers an alarm. In the case of system power failure, the system will automatically restart when the power returns.

Technical data

Environmental

- Dimensions:
 - Height: 500 mm (19.69 in.)
 - Width: 400 mm (15.75 in.)
 - Depth: 100 mm (3.94 in.)
- Weight: 12 kg (26.46 lb.)
- IP rating: IP 65
- Temperature range (On-line):
 - 20 to +60 °C (–4 to +140 °F)
- Temperature range (Off-line):
 - 40 to +70 °C (–40 to +158 °F)
- Humidity: 95% (relative) non-condensing
- Installation location: Inside nacelle use only

Power supply

- Power supply: 100 to 240 VAC, 50 to 60 Hz, 0.75 A maximum

Please contact:

SKF Condition Monitoring Center – Luleå
Auronum 30, SE-977 75 • Luleå, Sweden
Tel: +46 (0)31 337 1000 • Fax: +46 (0)920 134 40
Web: www.skf.com/cm

© SKF, @PTITUDE and MULTLOG are registered trademarks of the SKF Group.
All other trademarks are the property of their respective owners.

© SKF Group 2013

The contents of this publication are the copyright of the publisher and may not be reproduced (even extracts) unless prior written permission is granted. Every care has been taken to ensure the accuracy of the information contained in this publication but no liability can be accepted for any loss or damage whether direct, indirect or consequential arising out of the use of the information contained herein. SKF reserves the right to alter any part of this publication without prior notice.

Partners: US 4,768,380 • US 5,679,900 • US 5,845,230 • US 5,854,553 • US 5,992,237 • US 6,006,164 • US 6,199,422 • US 6,202,491 • US 6,275,781 • US 6,489,884 • US 6,513,386 • US 6,633,822 • US 6,789,025 • US 6,792,360 • WO/2003/048714 • US 5,633,811 • US 5,870,699 • US 6,437,692 • US 7,103,511 • US 7,697,492

PUB CM/P8 10674/2 EN • February 2013

Analogue inputs

- 16 analogue differential inputs
- Software controlled power supply for standard accelerometers (4 mA constant current) for each individual channel
- All channels are measured simultaneously
- Input range: ± 25 V
- Impedance: >100 k Ω

Digital inputs

- Two digital opto-isolated inputs
- Individual 12 V power supply, maximum 40 mA / channel
- Phase voltage range: 3 to 14 V
- Can interface with most standard sensors

Outputs

- Two relay driver outputs

Analogue measurement

- 24-bit AD conversion enables continuous data capture without gain or AC/DC switching necessary
- Simultaneous sampling of all 16 channels (no multiplexing), one A/D converter for each channel
- Simultaneous sampling of different channels with different sampling rates
- Frequency range: from DC to 40 kHz
- Dynamic range: 120 dB
- Signal to noise ratio: 90 dB
- Cross-talk rejection: 100 dB
- Accuracy amplitude: $\pm 2\%$ (up to 20 kHz), $\pm 5\%$ (20 to 40 kHz)
- Accuracy phase: $\pm 3^\circ$ (up to 100 Hz)
- Automatic detection of sensor fault and cable fault

Digital measurement

- Frequency range: 0.1 Hz to 12.5 kHz
 - Required pulse width:
 - >4 μ s for electrical positive
 - >40 μ s for electrical negative

- Accuracy frequency: 0.05% of measurement value (typically 0.01% up to 2.5 kHz)
- Pulse counting

Signal processing

- Time waveform
- Vector analysis with circular alarms
- FFT: 100 to 6 400 lines
- DPE (Digital Peak Enveloping)
- Integration / Derivation in frequency domain
- Window function: Hanning
- Customer formulated mathematical equations
- Dynamic alarm levels, active range determined on multiple parameters
- Data storage on time, event or alarm condition
- Detection of sensor and cable fault
- Watchdog and self testing

Interface

- Ethernet: 100 Mbit RJ45, TCP/IP (two ports)
- Ethernet switch for daisy chaining
- RS232 service interface
- CAN bus interface for data sharing with other systems
- RS485 (Modbus) interface for data sharing with other systems

Miscellaneous

- Calibration, traceable to BIPM
- CE certified according to EN61000
- Lightning protection: EN61000-6-2:1999, EN61000-4-5: 4 kV (On-line)

Installation and training

Installation and training available through your local SKF supplier or representative.

Product Support Plans (PSP)

A range of Product Support Plans is available to protect your investment. Contact your local SKF Reliability Systems sales representative for additional information.



Anexo II Ficha Técnica NI 9232

NI 9232

±30 V, IEPE and AC/DC Analog Input, 102.4 kS/s/ch, 3 Ch Module



- 3 channels, 102.4 kS/s/ch simultaneous AI; 41 kHz bandwidth
- ±30 V input, 24-bit resolution, 99 dB dynamic range
- Software-selectable AC/DC coupling; AC coupled (0.1 Hz)
- Software-selectable IEPE signal conditioning (0 mA or 4 mA); IEPE open/short detection
- Transducer Electronic Data Sheet smart sensor compatibility
- -40 °C to 70 °C operating range, 5 g vibration, 50 g shock

Overview

The NI 9232 is a 3-channel C Series dynamic signal acquisition module for making industrial measurements from integrated electronic piezoelectric (IEPE) and non-IEPE sensors with NI CompactDAQ or NI CompactRIO systems.

The NI 9232 delivers 99 dB of dynamic range and incorporates software-selectable AC/DC coupling and IEPE signal conditioning for accelerometers, tachometers, and proximity probes. The three input channels simultaneously digitize signals at rates up to 102.4 kHz per channel with built-in anti-aliasing filters that automatically adjust to your sample rate.

EMC Performance

To ensure EMC compliance, you must use a ferrite bead, such as part number 782802-01.

Recommended Software

NI sound and vibration analysis software, including the NI Sound and Vibration Measurement Suite and the NI Sound and Vibration Toolkit, provides signal processing functionality for performing condition monitoring and machine diagnostics including frequency analysis, order tracking, and display techniques such as orbit plots and shaft centerlines.

Recommended Accessories

- NI 9971 strain relief and operator protection
- EMI suppression ferrite for NI 9232 (782802-01)

Note: To ensure EMC compliance, you must use a ferrite bead, such as part number 782802-01.

Box Contents

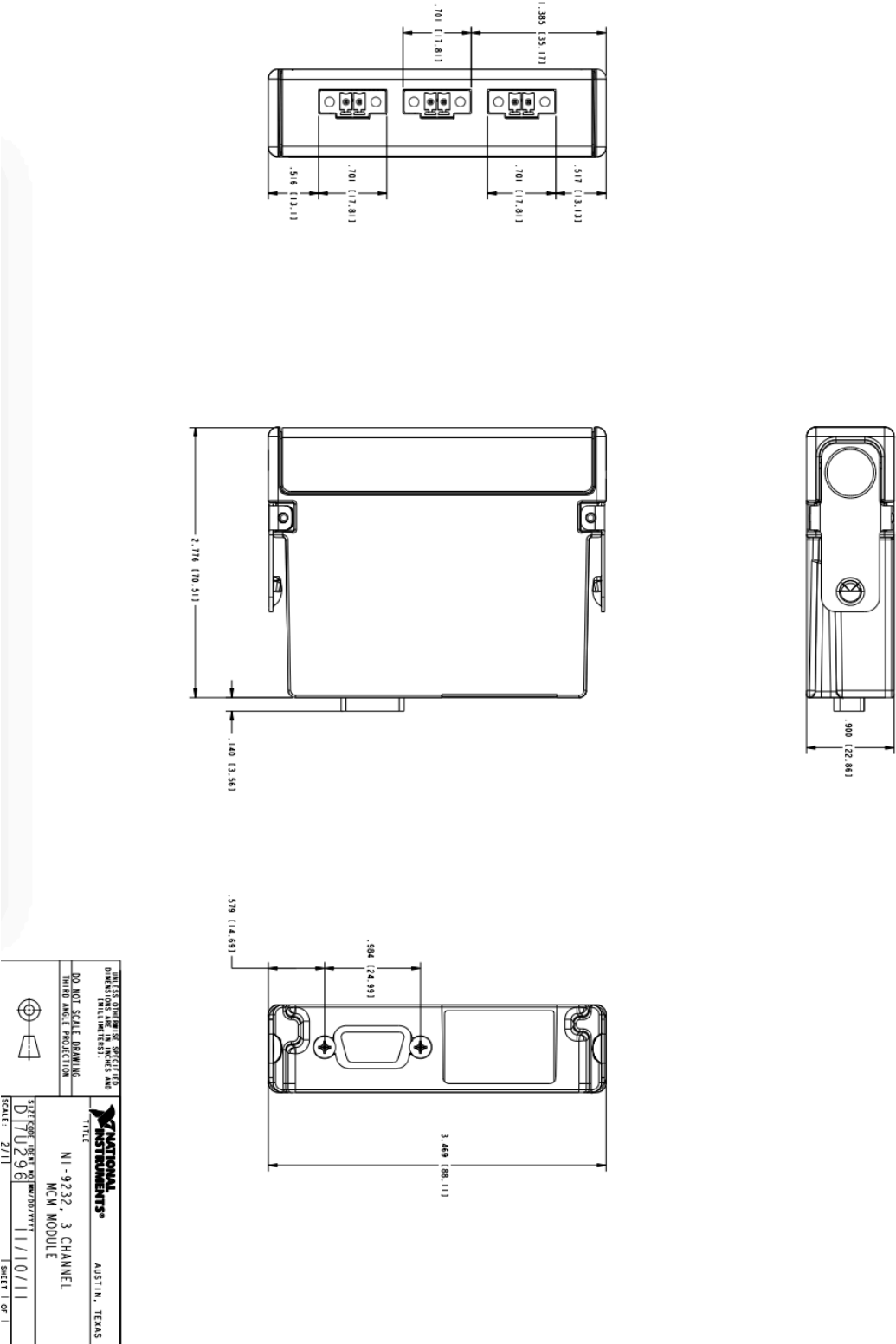
- 1 NI 9232 C Series module
- 1 NI 9232 Operating Instructions and Specifications manual

[Back to Top](#)

Comparison Tables

Product Name	Signal Ranges	Channels	Sample Rate	Simultaneous	Resolution	Excitation	Isolation	Connectivity
NI 9232	±30 V	3 Differential	102.4 kS/s/ch	Yes	24-Bit	4 mA	60 VDC Ch-Earth	Screw Terminal
NI 9234	±5 V	4 Differential	51.2 kS/s/ch	Yes	24-Bit	2 mA	None	BNC

[Back to Top](#)



Anexo III Ficha Técnica Bently Nevada (3500/42M)

3500/42M Proximito/Seismic Monitor



Description

The 3500/42M Proximito®/Seismic Monitor is a 4-channel monitor that accepts input from proximity and seismic transducers, conditions the signal to provide various vibration and position measurements, and compares the conditioned signals with user-programmable alarms. The user can program each channel of the 3500/42M using the 3500 Rack Configuration Software to perform any of the following functions:

- Radial Vibration
- Thrust Position
- Differential Expansion
- Eccentricity
- REBAM®
- Acceleration
- Velocity
- Shaft Absolute
- Circular Acceptance Region

Note: The monitor channels are programmed in pairs and can perform up to two of these functions at a time. Channels 1 and 2 can perform one function, while channels 3 and 4 perform another (or the same) function.

The primary purpose of the 3500/42M monitor is to provide:

1. Machinery protection by continuously comparing monitored parameters against configured alarm setpoints to drive alarms.
2. Essential machine information for both operations and maintenance personnel.

Each channel, depending on configuration, typically conditions its input signal to generate various parameters called "static values". The user can configure Alert setpoints for each active static value and Danger setpoints for any two of the active static values.

Specifications		3.94 mV/ μ m (100 mV/mil) or 7.87 mV/ μ m (200 mV/mil).
Inputs		
Signal	Accepts from 1 to 4 proximity, velocity or acceleration transducer signals.	Shaft Absolute, Direct
Input Impedance		3.94 mV/ μ m (100 mV/mil) or 7.87 mV/ μ m (200 mV/mil).
Standard I/O	10 k Ω (Proximitor® and Acceleration Inputs).	Shaft Absolute, Velocity
TMR I/O	The effective impedance of three Bussed TMR I/O channels wired in parallel to one transducer is 50 k Ω .	20 mV/(mm/s) pk (500 mV/(in/s) pk) or 5.8 mV/(mm/s) pk (145 mV/(in/s) pk) or 4 mV/(mm/s) pk (100 mV/(in/s) pk).
Power Consumption	7.7 Watts, typical.	Circular Acceptance Region
Sensitivity		See Radial Vibration.
Radial Vibration	3.94 mV/ μ m (100 mV/mil) or 7.87 mV/ μ m (200 mV/mil).	Outputs
Thrust	3.94 mV/ μ m (100 mV/mil) or 7.87 mV/ μ m (200 mV/mil).	Front Panel LEDs
Eccentricity	3.94 mV/ μ m (100 mV/mil) or 7.87 mV/ μ m (200 mV/mil).	OK LED
Differential Expansion	0.394 mV/ μ m (10 mV/mil) or 0.787 mV/ μ m (20 mV/mil).	Indicates when the 3500/42M is operating properly.
REBAM®	40 mV/ μ m (1000 mV/mil) or 80 mV/ μ m (2000 mV/mil).	TX/RX LED
Acceleration and Acceleration2	10 mV/(m/s ²) (100 mV/g).	Indicates when the 3500/42M is communicating with other modules in the 3500 rack.
Velocity and Velocity2	20 mV/(mm/s) pk (500 mV/(in/s) pk) or 5.8 mV/(mm/s) pk (145 mV/(in/s) pk) or 4 mV/(mm/s) pk (100 mV/(in/s) pk).	Bypass LED
Shaft Absolute, Radial Vibration		Indicates when the 3500/42M is in Bypass Mode.
		Buffered Transducer Outputs
		The front of each monitor has one coaxial connector for each channel. Each connector is short-circuit protected.
		Output Impedance
		550 Ω
		Transducer Power Supply
		-24 Vdc
		Recorder
		+4 to +20 mA. Values are proportional to monitor full-scale. The monitor provides individual recorder values for each channel. Monitor operation is unaffected by short circuits on recorder outputs.
		Voltage Compliance (current output)
		0 to +12 Vdc range across load. Load resistance is 0 to 600 Ω .

Anexo IV Ficha Técnica Bently Nevada (wSIM)

GE Measurement & Control

Essential Insight.mesh* Wireless System Product Datasheet

Bently Nevada* Asset Condition Monitoring



The wSIM device with Zone 0 Battery Module and Zone 0 External Power Module

Description

The Essential Insight.mesh* Wireless System is a wireless data acquisition platform that is fully integrated with System 1* classic software version 6.90 or later. The wSIM system requires the following components:

- A manager gateway
- Wireless sensor interface modules
- Repeaters

These components create a robust, auto forming mesh network. Each wSIM device has four channels. Each channel can be configured individually to support vibration and temperature measurements.

The wSIM devices support the Bently Nevada 200150, 200155 and 200157 accelerometers, as well as our 200125 K-Type, and standard J, T & E-Type thermocouple temperature sensors.

The main features of Essential Insight.mesh* Wireless System are:

- 200-meter maximum unobstructed range between wSIM devices operating in a mesh at 3m AGL heights¹
- Static data rate configurable from once-per-minute to once-per-day²
- Dynamic data resolution configurable up to 3200 lines
- Dynamic data frequency span configurable from 0-100 Hz up to 0-10000 Hz
- Static and dynamic Data-on-Demand
- Battery can be replaced in the field and is intrinsically safe.
- Starter and expansion kits are available with all necessary wireless components.



ISA100 Manager Gateway



FCC and IC Compliance

This device complies with Part 15 of the FCC Rules. Operation is subject to the following two conditions:

- This device may not cause harmful interference.
- This device must accept any interference received, including interference that may cause undesired operation.

Specifications

All specifications are at +25 °C (+77 °F) unless specified otherwise.

Part Number	100M5186
Name	BN ISA100 Manager Gateway
Mesh Radios	Supports a maximum of 50 wireless devices in any combination of I/O or repeater devices

Input

Input Voltage	90 to 264 VAC
Input Power	10 watts maximum
Power Connector	Located on the back of the chassis

Output

ERP (output power without any antenna)	10.7 dBm
ERP (output power with included antenna)	12.7

Status LEDs

Power	Indicates manager gateway powered
Radio Network	Indicates RF radio operation

Antenna

Antenna Type	1/2 wave helictic base-wound monopole
Antenna Gain	2 dBi

Housing Material

Housing	Powder coated 5052-H32 Aluminum
19 inch rack-mount	14 gauge powder coated ROHS stainless steel faceplate

Optional Antennas

Part Number	1285519-01
Cable	75 ft (23 m)
Frequency	2400-2500 MHz
Gain	6 dBi Omni Directional
Cable Attenuation	6.8 dB at 2.5 GHz
Polarization	Vertical
Impedance	50 Ohm
Weight	0.24 lbs (0.1 kg)
Length	12 in (30 cm)
Base Diameter	1.27 in (3.22 cm)
Material	Fiberglass Radome
Radome Diameter	0.75 in (1.9 cm)
Wind Survival	>150 MPH
Operating Temperature	-40°C to 85°C (-40°F to 185°F)

Wireless Sensor Interface Module (wSIM)

Part Number	185410
Name	Wireless Sensor Interface Module
ERP	10.96 dBm

Storage and Transport

Operating Temperature	-30°C to +65°C (-22°F to 149°F)
Humidity	95% non-condensing
Vibration	5 g's pk any axis
Rating	IP67

Battery Pack

Screw Torque	10in-lbs
--------------	----------

Antenna

Antenna Type	¼ Wavelength Monopole
Antenna Gain	1.414 dBi

Materials

Housing	10% glass fiber Polycarbonate with TPE antenna enclosure and LED windows
Mounting base	304/304L Stainless Steel

Communication

Interfaces	IEEE 802.15.4
Infrared	9600 baud

Sensors

Sensor Input	Four sensor inputs per device Sampled sequentially
Supported Sensors	200150, 200155, & 200157 Accelerometers 200125 K-Type Thermocouple J, K, T & E - Type Thermocouples

A/D Resolution

Acceleration	16 bits (14 effective bits)
Temperature	24 bits (21 effective bits)


Scan Rates Per Channel

Static Data Rate	1 min to once per day Note: Increased data acquisition rates may dramatically lower battery life and reliability of data as the device requires recharge time. You can use an energy harvester to improve performance.
Dynamic Data Rate	Once per day to once per every 30 days
Data on Demand	Static and dynamic data

Temperature Channel

Full Scale Range	
J - Type	-209 °C (-344 °F) to 1199 °C (2190 °F)
K - Type	-199 °C (-326 °F) to 1369 °C (2496 °F)
E - Type	-199 °C (-326 °F) to 999 °C (1830 °F)
T - Type	-199 °C (-326 °F) to 399°C (750°F)
Other	
Accuracy	±5°C from ideal input

Anexo V Ficha Técnica Shinkawa Electric VM-5



VM-5K Dual Vibration Monitor

Inputs signals from the FKVK Series Vibration Transducers corresponding to 2 channels.
Simultaneously provides 2 points of shaft vibration monitoring within one unit.

VM-55 Vibration Monitor

Simultaneously monitors both relative and absolute vibrations or relative and seismic vibrations.

VM-5U Dual Seismic Monitor

Inputs signals from the CV Series Velocity Transducer corresponding to 2 channels.

VM-5M Dual Path Monitor

Simultaneously monitors the velocity/acceleration and displacement/velocity vibration of rotating machinery detected by CV Series Velocity Transducer or CA Series Acceleration Transducer. Detects machine failures early on and informs the operator of these failures.

VM-5B Dual Acceleration Monitor

Inputs signals from the CA Series Acceleration Transducer corresponding to 2 channels.

	VM-5K Dual Vibration Monitor	VM-55 Vibration Monitor	VM-5U Dual Seismic Monitor	VM-5B Dual Acceleration Monitor	VM-5M Dual Path Monitor
INPUT TRANSDUCER	FKVK series, VC series	FKVK series, CV series	CV series	CA series	CV series, CA series
INPUT POINT	2 points		1 point		
MONITOR RANGE	0 to 500 μm pk-pk (0 to 15 mils pk-pk)	0 to 800 μm pk-pk (0 to 15 mils pk-pk)	0 to 500 μm pk-pk (0 to 20 mils pk-pk) or 0 to 50 mm/s pk (0 to 2 in/s pk) or 0 to 50 mm/s rms (0 to 2 in/s rms)	0 to 200 m/s ² pk (0 to 20 G pk) or 0 to 100 mm/s pk (0 to 2 in/s pk) or 0 to 200 m/s ² rms (0 to 20 G rms) or 0 to 100 mm/s rms (0 to 2 in/s rms)	0 to 200 m/s ² (0 to 20 G) pk or rms or 0 to 50 mm/s (0 to 2 in/s) pk or rms or 0 to 100 mm/s (0 to 2 in/s) pk or rms or 0 to 500 μm pk-pk (0 to 20 mils pk-pk)
RECORDER OUTPUT CONVERSION ACCURACY	+/- 0.5% of F.S. at 100Hz at 25 °C +/- 2.0% of F.S. at 100Hz at 0 to 65°C	+/- 3.0% of F.S. at 100Hz at 25°C +/- 5.0% of F.S. at 100Hz at 0 to 65°C	+/- 0.5% of F.S. at calibration frequency at 25°C +/- 2.0% of F.S. at calibration frequency at 0 to 65°C		
ALARM SET POINT	4 points (DANGER1, ALERT1, DANGER2, ALERT2)				